INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INTERNET
Redes libres de censura

ASTROFÍSICA
¿Cómo será el cosmos del futuro?

INGENIERÍA
Materiales que cicatrizan

NEUROCIENCIA DE LA IDENTIDAD | FUTURO DEL COSMOS | INTERNET SIN CENSURA

Neurociencia de la Identidad

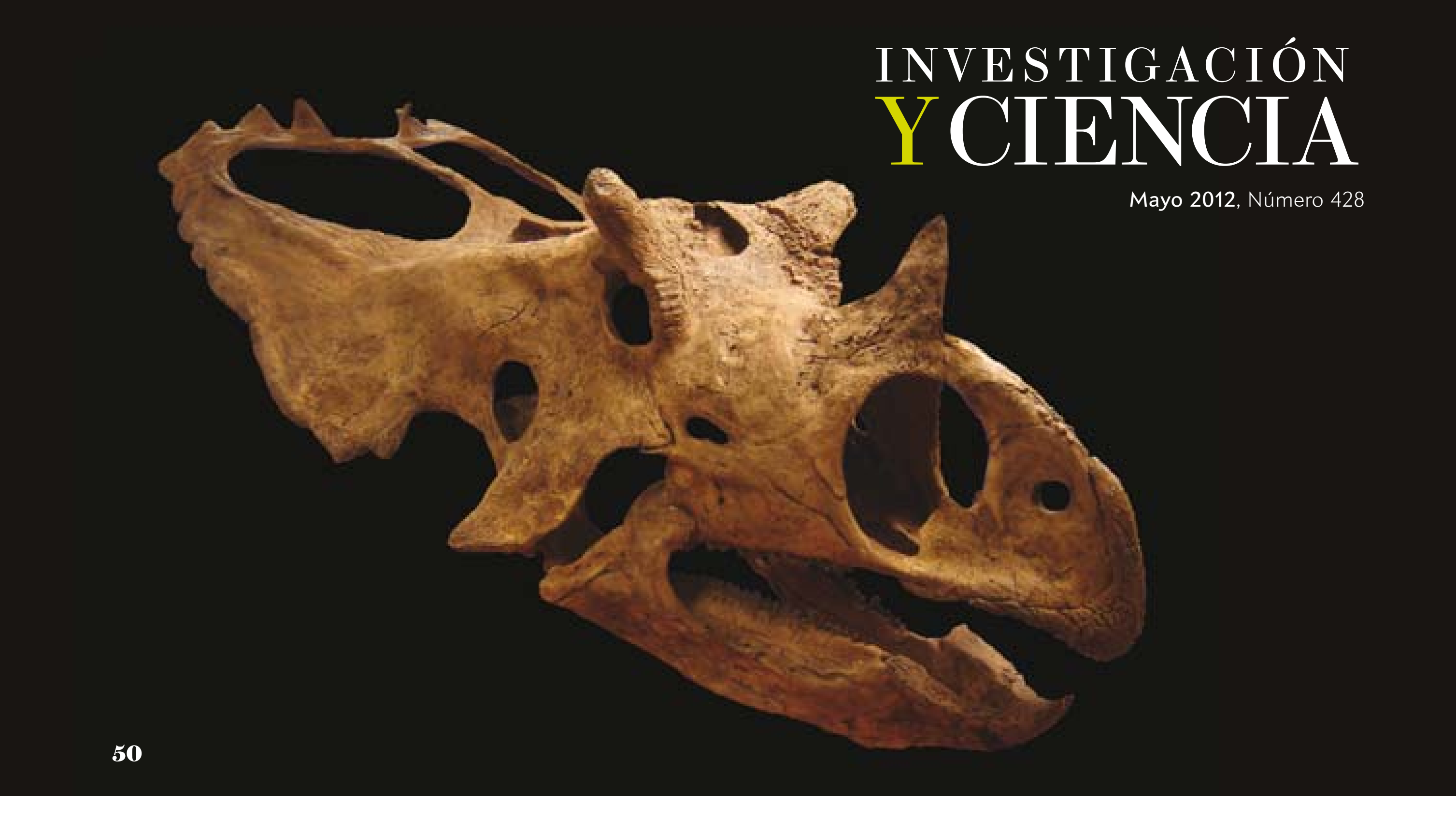
Ciertos genes móviles modifican la actividad cerebral de modo que nos hacen únicos



N.º 428

00428
9 770210 136004

6,50 EUROS

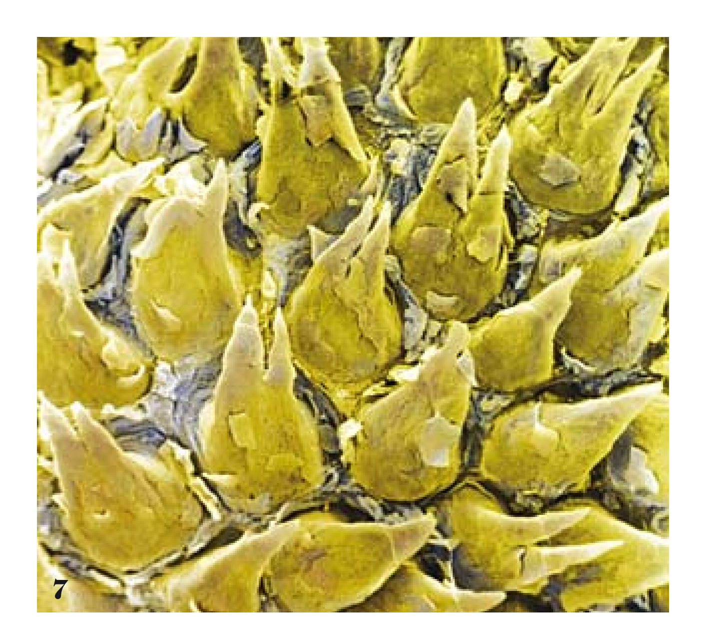


INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mayo 2012, Número 428

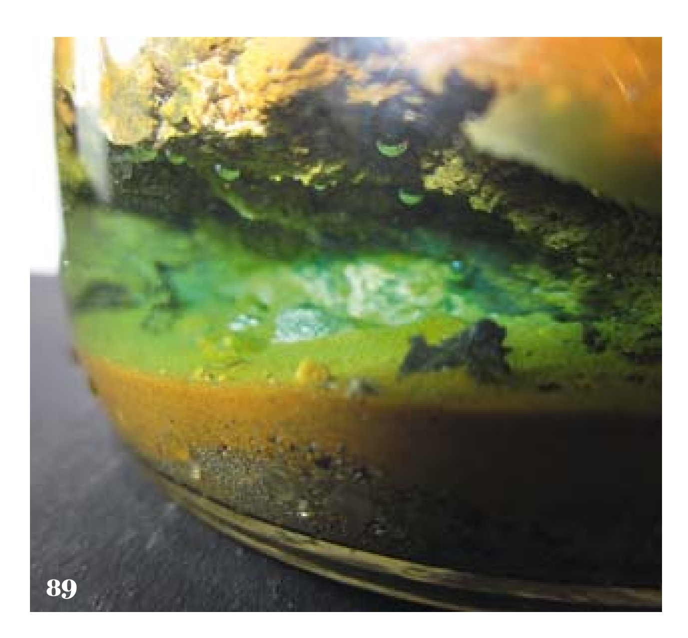
50

ARTÍCULOS

CORTESÍA DE MARK LOEWEN, MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE UTAH (*calavera de Utahceratops*)


7

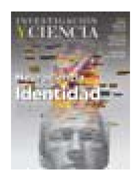

34


89

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Nuestra identidad individual depende de la interacción entre genes y ambiente. La neurociencia ha empezado a descubrir cuán sutil puede ser la contribución genética en el cerebro. Pequeños fragmentos de ADN, conocidos como transposones, se desplazan de un lado a otro en las neuronas y pueden alterar la función cerebral, lo que da lugar a comportamientos distintos, incluso entre gemelos idénticos. Imagen de Jean-Francois Podevin.

redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2012

MEDICIONES EN MARTE

En «Buscando vida en Marte» [Investigación y Ciencia, enero de 2012], Peter H. Smith revisa la exploración científica del planeta rojo, en el que parecen existir indicios de notables variaciones climáticas. En la Tierra, el clima experimenta grandes alteraciones que se creen debidas a los cambios orbitales. El geofísico serbio Milutin Milankovitch identificó tres de ellos: en la excentricidad, la precesión axial y la inclinación del eje. ¿Sufre también Marte estos ciclos de Milankovitch?

Jerry L. Lundry
Bellevue, Washington

En su análisis de la misión Phoenix, Smith indica que la nave recorrió 600 millones de kilómetros y calcula en 15 minutos el tiempo que tardaba la luz en llegar a la Tierra. Pero, a una velocidad aproximada de 300.000 kilómetros por segundo, la luz tardaría unos 33 minutos en completar esa distancia.

Roger Rubens
Boynton Beach, Florida

Responde Smith: *Con respecto a la pregunta de Lundry, los ciclos de Milankovitch ejercen sobre el clima marciano un efecto aún mayor que sobre el terrestre. No solo el eje exhibe un movimiento de precesión (cada 51.000 años), sino que la proximidad de Júpiter modifica la excentricidad de la órbita y la inclinación del eje de rotación. Dado que la oblicuidad experimenta variaciones muy amplias y caóticas (los ciclos pueden durar millones de años), el clima cambia hasta el punto de que, cuando la inclinación es muy acusada, los casquetes de hielo polares pueden trasladarse al ecuador y formar glaciares sobre las cumbres volcánicas.*

Para aclarar el tiempo de propagación de la luz en la misión Phoenix, téngase en cuenta que la nave espacial no viajó a Marte en línea recta, sino que siguió un trayecto más extenso a lo largo de una órbita elíptica en torno al Sol, con Marte en el afelio. Durante la misión, la distancia entre la Tierra y Marte ascendía a unos 250 millones de kilómetros, por lo que la luz tardaba algo menos de 15 minutos en cubrir el trayecto.

RUIDO HOLOGRÁFICO

Con relación al artículo «¿Es digital el espacio?», de Michael Moyer [Investigación y Ciencia, abril de 2012], me gustaría saber si se barajan hipótesis alternativas para explicar un posible resultado positivo en el «holómetro» de Craig Hogan.

El investigador presupone que una vibración en el divisor del rayo láser de uno de los dos interferómetros implicaría haber detectado el «murmullo cuántico» de bits. Pero, dado que el tamaño del divisor de rayos resulta mucho mayor que la escala cuántica, me pregunto cómo es posible descartar otros tipos de temblores más «mundanos». Incluso la agitación térmica de la lente podría llenar de ruido la señal.

Miguel Brun Usan
Barcelona

Responde Hogan: *Uno de los principales aspectos que estamos teniendo en cuenta en el diseño de nuestro experimento es, de hecho, la manera de aislar el «ruido holográfico» de otras fuentes de ruido. Una de ellas es, sin duda, la agitación térmica. Pero la mayor fuente de ruido irreducible de la que estamos al tanto es el «ruido de disparo de fotones». Este, cuyo origen se encuentra en la naturaleza cuántica de la luz láser en las cavidades, resulta mucho mayor que el ruido holográfico que pretendemos detectar. Con todo, estas dos causas de ruido (y otras muchas) podrán aislarse, ya que no se hallan correlacionadas en los dos interferómetros.*

Otras fuentes de ruido no podrán identificarse de ese modo. La más importante de ellas provendrá de las interferencias con las radiofrecuencias del entorno. Para suprimirlas, protegeremos el dispositivo y emplearemos pruebas diagnósticas espectrales que nos permitan detectarlas.

El ruido holográfico que intentamos medir exhibe un espectro muy particular: un continuo con ceros característicos en los períodos correspondientes al tiempo que tarda la luz en viajar a lo largo de los brazos. Ninguna otra fuente de ruido debería exhibir un espectro así.

Por último, planeamos trabajar también con una configuración en la que el dispositivo resulte inmune al ruido holográfico, pero idéntica en sus demás aspectos a la original.



Abril 2012

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Erratum corrige

Como nos indica nuestro lector José Antonio García Regueiro, en el artículo «Los ácidos grasos y la salud» del pasado mes de marzo aparece en varias ocasiones el término «ácido alfa-linoleico», cuando en realidad debería figurar «ácido alfa-linolénico».

Apuntes

FÍSICA

Una nueva arruga en el tiempo

Durante años, los físicos han perfeccionado distintas capas de invisibilidad, es decir, configuraciones físicas que desvían ingeniosamente la luz alrededor de una región del espacio, ocultando cualquier objeto que pueda estar dentro de ella. Ahora, un grupo de la Universidad Cornell ha construido la primera capa temporal, un dispositivo que oscurece un objeto o un suceso en un momento específico del tiempo.

En una demostración preliminar, Moti Fridman, investigador posdoctoral de la Universidad Cornell, y sus colaboradores hicieron pasar un rayo láser a través de un dispositivo experimental hasta llegar a un detector. Un objeto físico o incluso otro rayo de luz que se interpusiera en el itinerario del rayo crearía un cambio en la luz láser que sería registrado por el detector. Sin embargo, mediante una ingeniosa estructura óptica, los investigadores lograron abrir una breve brecha temporal en el rayo, cerrándola después como si el rayo hubiera pasado sin ninguna perturbación y de tal manera que el detector no registrase la interrupción. Esta brecha permite que cualquier cosa u objeto que, de otro modo, habría afectado al rayo pase desapercibido sin dejar ninguna huella que el detector pueda captar.

Los científicos utilizaron la capa para oscurecer un pulso óptico que, en condiciones normales, interactúa con el láser y produce un pico característico en una longitud de onda determinada. Sin embargo, al ocultarlo mediante la capa temporal, el pico era casi indetectable.

La capa, descrita en el número del 5 de enero de *Nature*, se basa en el hecho de que la luz de distintos colores se mueve a velocidades diferentes al atravesar ciertos medios. Utilizando una lente temporal, el grupo de Fridman dividió un rayo láser de un único color en una gama de longitudes de onda; después, ralentizaron la mitad de esas longitudes de onda y aceleraron las demás. Esto creó una brecha temporal muy breve que podía cerrarse de nuevo, antes de que el rayo llegase al detector, al revertir el proceso haciendo que el rayo volviese a tener una sola longitud de onda, aparentemente inalterada.

La brecha temporal conseguida por estos investigadores es extremadamente corta, de solo cincuenta picosegundos o billonésimas de segundo de duración. Advierten que es posible ampliar un poco la brecha, pero que los efectos de dispersión y refracción limitan la duración de la capa temporal a unos pocos nanosegundos.

—John Matson

CLIMA

Trabajo para deshollinadores



La humanidad ha hecho muy poco para combatir el cambio climático. Las emisiones mundiales de dióxido de carbono alcanzaron, de nuevo, un máximo en 2010. Los últimos encuentros internacionales que buscaban acordar un tratado mundial para solucionar el problema han postergado las medidas principales hasta el año 2020. Por fortuna, existe una alternativa: reducir las emisiones de otros gases de efecto invernadero. Según un análisis económico y científico publicado en enero en la revista *Science*, las medidas para reducir las emisiones de metano y de carbono negro (hollín) podrían mejorar la calidad del aire, la salud de los seres humanos y la productividad agrícola. Y lo que es aún mejor, la aplicación de tan solo catorce medidas de control de las emisiones de hollín y de metano en todo el mundo permitiría obtener el noventa por ciento de los beneficios potenciales. Una ventaja adicional: estas catorce medidas también reducirían el calentamiento global en aproximadamente medio grado centígrado antes del año 2050, según los modelos informáticos desarrollados.

Tanto el metano como el hollín permanecen poco tiempo en la atmósfera en comparación con el CO_2. Según algunos científicos, el efecto de su reducción podría ser evidente en tan solo algunas semanas o meses, en lugar de en décadas, como sucede con las emisiones de CO_2. Los métodos capaces de frenar de manera inmediata el calentamiento global incluyen la eliminación de las emisiones de metano de las minas de carbón mediante la captura y quema del gas, la eliminación de la liberación intencionada o accidental del metano producido en las perforaciones para extraer petróleo y gas natural, la captura del gas generado en los vertederos de EE.UU. y China, y la promoción del reciclaje y la conversión en abono de la basura biodegradable.

Ello no significa que podamos despreocuparnos de las emisiones de CO_2. Si seguimos emitiendo este gas al ritmo actual, estaremos acumulando problemas para el futuro. Sin embargo, empezar con el hollín y el metano nos proporcionaría más tiempo y, lo que quizás es más importante, reduciría la probabilidad de que se produzca un cambio climático catastrófico.

—David Biello

THOMAS FUCHS; WIKIMEDIA COMMONS/LEROY WOODSON/DOMINIO PÚBLICO

EVOLUCIÓN

Conductores en el asiento trasero

El cuerpo humano alberga al menos diez veces más células bacterianas que células humanas. Conocida en su conjunto como microbioma, esta comunidad puede desempeñar un papel en la regulación de nuestro riesgo a padecer obesidad, asma y alergias. Ahora, algunos investigadores empiezan a plantearse la posibilidad de que este microbioma pueda tomar parte en un proceso todavía más esencial: la selección de pareja y, en último término, la evolución.

La mejor prueba de que el microbioma puede desempeñar este papel crítico procede del estudio de insectos. Un experimento de 2010 realizado por Eugene Rosenberg, de la Universidad de Tel Aviv, mostró que el criterio utilizado por las moscas del vinagre *Drosophila pseudobscura* para seleccionar pareja dependía de la dieta que se les suministraba: las moscas se apareaban solo con otras moscas que hubieran consumido lo mismo. Una dosis de antibióticos eliminó estas preferencias (las moscas volvieron a aparearse sin tener en cuenta la dieta), lo que sugería que el cambio estaba impulsado por alteraciones en los microorganismos del tubo digestivo producidas por la dieta, y no por la dieta en sí.

PHOTO RESEARCHERS, INC. (*microbios*); SOCIEDAD ANDALUZA PARA LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA (*feria*)



Para determinar si los microbios del tubo digestivo podían afectar a la longevidad de un individuo y a su capacidad de reproducirse, Seth Bordenstein, de la Universidad Vanderbilt, y sus colaboradores, inocularon el antibiótico rifampicina a los termes *Zootermopsis angusticollis* y *Reticulitermes flavipes*. El estudio, publicado en julio de 2011 en *Applied and Environmental Microbiology*, encontró que los termes tratados con el antibiótico mostraban una menor diversidad de bacterias intestinales después del tratamiento, y que producían menos huevos. Bordenstein argumenta que la reducción de determinados microorganismos beneficiosos, algunos de los cuales ayudan a la digestión y a la absorción de nutrientes, provoca desnutrición en los termes, lo que compromete su capacidad de producir huevos.

Esos estudios forman parte de una corriente creciente entre los biólogos evolutivos que sostiene que ya no es posible separar los genes de un organismo de los de sus bacterias simbiontes. Todos forman parte de un único «hologenoma».

«Ha habido una larga tradición de separar la microbiología de la botánica y la zoología, pero todos los animales y plantas tienen millones o miles de millones de microorganismos asociados a ellos —dice Rosenberg—. Hay que considerar el hologenoma al completo para comprender a un animal o una planta.» En otras palabras, las fuerzas de la selección natural ejercen presión sobre una planta o un animal y toda su dotación completa de microbios. En este sentido, Bordenstein demostró que cuanto más cercana es la distancia evolutiva entre determinadas especies de avispas, mayores son las similitudes en su microflora.

Los investigadores creen que el microbioma también es esencial para la evolución humana. «Dada la importancia del microbioma en adaptaciones humanas como la digestión, el olfato y el sistema inmunitario, parece muy probable que el microbioma humano haya tenido un efecto en la especiación —sostiene Bordenstein—. Probablemente la microbiota sea tan importante como los genes».

—Carrie Arnold

Somos uno: los biólogos dicen que los microbios comunes del tubo digestivo, como *Bacteroides fragilis*, pueden ser tan importantes como nuestros genes.

AGENDA

CONFERENCIAS

2 de mayo
La impregnación corporal por compuestos tóxicos: salud, cultura y sociedad
Miquel Porta, Instituto Municipal de Investigaciones Médicas
Ateneo Barcelonés
Barcelona
www.imim.es/agenda

24 de mayo
Los secretos del cerebro se esconden en... ¡la piel!
Adolfo López de Munain, Hospital Donostia (San Sebastián)
Fundación BBVA
Bilbao
www.fbbva.es

29 de mayo
Cerebro y máquina
José M. Carmena, Universidad de California en Berkeley
Residencia de Estudiantes
Madrid
www.residencia.csic.es

JORNADAS

Del 7 al 9 de mayo - Congreso
Neuromagic 2012
Isla de San Simón
Redondela
www.fundacionilladesansimon.org

10, 11 y 12 de mayo
Feria de la ciencia
Palacio de Congresos y Exposiciones
Sevilla
www.feriadelaciencia2012.org



12 de mayo - Jornada
Un asunto de gravedad: Galileo y Newton
Cosmocaixa
Barcelona
www.planetadavinci.com/GalileuNewton.pdf

21 y 22 de mayo - Debate
Contaminación del agua y salud humana
Parque de Investigación Biomédica de Barcelona
www.bdebate.org/debat/water-pollution-and-human-health

23 y 24 de mayo - Simposio
La levadura: un organismo modelo para la investigación biomédica
Universidad de Oviedo
www.fundacionareces.es

MEDIOAMBIENTE

Lo que queda del día

El terremoto y el posterior tsunami que azotaron Japón en marzo del año pasado crearon unos veinticinco millones de toneladas de residuos, gran parte de los cuales fueron arrastrados por el océano. Poco después del desastre, los satélites fotografiaron y rastrearon grandes alfombras de residuos (materiales de construcción, barcos y objetos domésticos) flotando cerca de la costa japonesa. Ahora, según los modelos informáticos desarrollados por Nikolai Maximenko y sus colaboradores de la Universidad de Hawai y de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano estadounidense (NOAA), los residuos se dirigen hacia las islas noroccidentales de Hawai y podrían llegar allí este año.

Conscientes de los riesgos que entrañan los residuos flotantes, los científicos se están tomando muy en serio la posible amenaza. En la actualidad, un cuarenta por ciento de la superficie oceánica mundial alberga residuos de tamaños dispares, desde contenedores de carga vacíos hasta aparejos de pesca abandonados o pequeños trozos de plástico que pueden atrapar o envenenar a mamíferos marinos. Los investigadores quieren averiguar no solo si los residuos procedentes de Japón podrían llegar hasta Hawai, sino también cómo podrían interactuar con los que ya se encuentran en aquella zona.

Los vientos y las corrientes marinas han dispersado los residuos procedentes del tsunami, de manera que ya no son visibles mediante los satélites de la NOAA, así que la agencia está intentando acceder a satélites de mayor resolución para localizarlos. Este mismo año, un grupo de expertos de 5Gyres, una organización sin ánimo de lucro especializada en rastrear y analizar residuos marinos, navegará por el norte del Pacífico para investigar los procedentes del desastre japonés.

Algunos científicos ya han encontrado restos del tsunami en el mar. En septiembre, una nave rusa encontró un barco de pesca japonés, una nevera, un televisor y otros electrodomésticos flotando al oeste del atolón de Midway. En diciembre, grandes boyas de pesca japonesas llegaron a las orillas de la bahía Neah, en el estado de Washington y cerca de Vancouver.

Si objetos de ese tipo chocaran contra los frágiles arrecifes coralinos que rodean las islas noroccidentales de Hawai, los resultados podrían ser catastróficos. Los posibles riesgos incluyen daños físicos a los arrecifes y la contaminación de playas que constituyen hábitats importantes para albatros, focas monje de Hawai, tortugas marinas verdes y otras especies endémicas y en peligro de extinción. También suponen una preocupación los materiales peligrosos, como los residuos radiactivos, aunque estudios recientes muestran que su llegada a las costas ha sido mínima.

Nancy Wallace, directora del Programa de Residuos Marinos de la NOAA, afirma que la agencia se prepara para el mejor y el peor de los casos posibles. Esta organización, y otras más, tienen planes para hacerse cargo de los restos, incluidos los que puedan hallarse contaminados. Tanto si los residuos procedentes del tsunami llegan a las costas como si no, no cabe duda de que están en algún lugar de los mares, empeorando un problema ya de por sí grave y creciente.

—Elizabeth Grossman



Después del desastre: Casas parcialmente inundadas por el tsunami que asoló Sendai.

AP PHOTO

ENTOMOLOGÍA

Moscas secuestradoras de cuerpos

Se suponía que el montón de abejas muertas había de convertirse en comida para una santateresa recién capturada. John Hafernik, profesor de biología en la Universidad estatal de San Francisco, había recogido unas abejas (*Apis mellifera*) muertas del suelo, bajo unas farolas del campus universitario. Las dejó en un frasco sobre la mesa y se olvidó de ellas. Pronto tuvo una sorpresa. «La siguiente vez que miré el frasco, los cadáveres se encontraban rodeados por numerosas crisálidas de mosca.» Una mosca (*Apocephalus borealis*) había puesto sus huevos en las abejas, empleando su cuerpo como hogar para sus larvas en desarrollo. El montón de abejas muertas terminó revelando un nuevo sospechoso, desconocido hasta el momento, del síndrome de despoblamiento de las colmenas, una afección misteriosa que durante varios años ha estado causando una reducción en las poblaciones de abejas melíferas, necesarias para la polinización de numerosos cultivos importantes [*véase* «Salvar la abeja melífera», de Diana Cox-Foster y D. van Engelsdorp; Investigación y Ciencia, junio de 2009 y «La silenciosa pandemia de las abejas», de Aránzazu Meana, R. Martín Hernández y Mariano Higes; Investigación y Ciencia, octubre de 2009]. Al parecer, las moscas parásitas que habían atacado a las abejas de Hafernik se estuvieron apoderando también de los cuerpos de abejas melíferas en otras partes del país. En enero, la revista *PLoS ONE* publicaba en línea una descripción detallada de este fenómeno.

Hafernik sospecha que ese ataque de la mosca (que también parasita a abejorros y avispas papeleras) a las abejas melíferas sería un fenómeno reciente. «Estas abejas son uno de los insectos mejor estudiados del mundo. Si la mosca hubiera sido desde hace tiempo uno de sus parásitos nos habríamos dado cuenta.»

La mosca deposita sus huevos en el abdomen de una abeja. Varios días después, la abeja parasitada abandona el nido (a menudo de noche) en una misión solitaria a ninguna parte. Estas abejas suelen volar hacia la luz y serpentean incapaces de controlar su propio cuerpo. Una vez la abeja muere, hasta trece larvas de mosca se abren paso desde su cuello.



Miembros del equipo de Hafernik encontraron indicios de la mosca en el 77 por ciento de las colmenas que analizaron en el Área de la Bahía de San Francisco, así como en algunas colmenas del agrícola Valle Central de California y en Dakota del Sur. Investigaciones previas habían encontrado pruebas de que ácaros, un virus o un hongo, o una combinación de estos factores, podrían ser responsables del extenso despoblamiento de las colmenas. En el caso de las colmenas afectadas estudiadas por el grupo de Hafernik, las abejas (y las moscas parásitas y sus larvas) contenían trazas genéticas de un parásito y un virus previamente implicados en el síndrome. Esta doble infección sugiere que las moscas pueden estar dispersando características adicionales de debilitamiento de las colmenas.

—Katherine Harmon

¿QUÉ ES ESTO?

Sensibilidad a la presión: La experiencia de disfrutar de sus alimentos favoritos no solo supone distinguir los sabores, sino también notar las distintas texturas en la lengua. La mayoría de las irregularidades de la superficie de la lengua corresponden a papilas filiformes, responsables de la sensación táctil. En esta imagen de la lengua humana tomada mediante un microscopio electrónico de barrido, a mil quinientos aumentos, las papilas presentan el aspecto de brotes cónicos. «Notan cómo son desviadas por algo que entra en contacto con ellas, incluida la presión de un líquido pesado», afirma Robert F. Margolskee, director adjunto del Centro Monell de Sentidos Químicos de Filadelfia. Las papilas muestran un aspecto escamoso porque constantemente están desprendiéndose de células viejas y generando otras nuevas. *—Ann Chin*



CORTESÍA DE CHRISTOPHER QUOCK (*abeja*); PHOTO RESEARCHERS, INC. (*lengua*)

MEDICINA

Vacunas terapéuticas contra el VIH

O cómo evitar el uso crónico de antirretrovíricos

Los antirretrovíricos han reducido en un 95 por ciento la morbilidad y mortalidad en pacientes infectados por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). Sin embargo, su elevado coste, la obligación de tomarlos de por vida, los efectos secundarios y el riesgo de desarrollo de resistencias constituyen problemas asociados pendientes de resolver. Además, en países en vías de desarrollo donde el sida se ha convertido en una barrera de primer orden para el progreso económico, el número de personas infectadas aumenta sin cesar. Pese a que en los últimos años esta tendencia se ha ralentizado gracias al tratamiento de una mayor proporción de pacientes, el número de nuevas infecciones sigue superando el de personas medicadas. Razones económicas, sociales, culturales y políticas obstaculizan la cobertura completa del tratamiento en estos países. Por ello es necesario el desarrollo de alternativas terapéuticas al uso de antirretrovíricos de por vida.

Erradicación y curación funcional

Se han propuesto dos alternativas al tratamiento antirretrovírico crónico. Una de ellas corresponde a la erradicación. Se ha publicado el caso de un paciente infectado por VIH que, tras serle transplantadas células hematopoyéticas carentes del correceptor CCR5, esencial para la entrada del VIH a la célula, presentó unos niveles de replicación vírica indetectables, a pesar de haber abandonado el tratamiento con antirretrovíricos. Parece que la estrategia ha logrado eliminar todo rastro del virus en esta persona [*véase* «Cerrar el paso al VIH», por Carl June y Bruce Levine, *en este mismo número*]. Se han planteado también otros enfoques para erradicar la infección en un paciente determinado: intensificación del tratamiento antirretrovírico, terapia con células madre, terapia génica y eliminación de células latentes infectadas. Sin embargo, es improbable que tengan éxito. De hecho, no existen modelos biológicos que los apoyen.

La otra alternativa a los antirretrovíricos se basa en el concepto de *curación funcional*, es decir, lograr que el paciente, aunque sea portador del virus, no requiera medicación. Este enfoque está basado en la observación de que una baja proporción de pacientes infectados (los progresores lentos o controladores de élite) son capaces de mantener la multiplicación vírica por debajo de una tasa umbral, sin presentar alteraciones en los niveles de los linfocitos T CD4 durante más de 25 años, lo que los mantiene asintomáticos. Se ha propuesto que esta cura funcional natural podría deberse a una potente respuesta inmunitaria específica frente al virus. Todos estos datos han precipitado el desarrollo de estrategias basadas en la formación de nuevas células T CD8 asesinas específicas frente al VIH, además de células T CD4 coadyuvantes, mediante la utilización de vacunas terapéuticas, vacunas cuyo objetivo no es evitar una infección (función preventiva) sino tratar a las personas ya infectadas mediante el refuerzo de su sistema inmunitario.

Células dendríticas

La mayoría de las vacunas terapéuticas se han ensayado antes con fines preventivos. Inicialmente, se recurrió a los modelos clásicos exitosos como la utilización del virus completo inactivado o de proteínas recombinantes de la cápside vírica. En

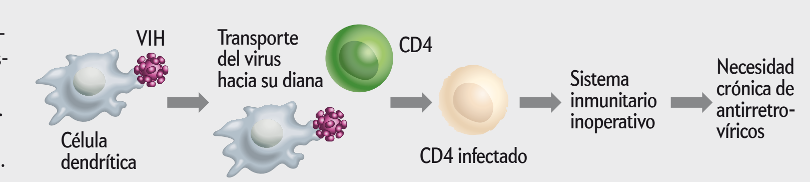
El objetivo de una vacuna terapéutica es conseguir la curación funcional del paciente (este es portador del virus, pero no le produce ningún daño porque no es capaz de replicarse). La figura *A* muestra lo que suele ocurrir cuando una persona se trata solo con antirretrovíricos. Al iniciar el tratamiento, la carga vírica en sangre desciende hasta unos niveles indetectables y la infección no evoluciona a sida porque el virus está controlado. Cuando el tratamiento se interrumpe, la cantidad de virus vuelve, en pocas semanas, a un nivel similar al inicial, con lo que aumenta de nuevo el riesgo de desarrollar sida. La figura *B* ilustra lo que ocurre cuando se aplica una vacuna terapéutica. El paciente inicia el tratamiento de la misma manera que en la figura *A*; cuando la carga vírica desciende hasta niveles indetectables, se administra la vacuna. Una vez interrumpido el tratamiento con antirretrovíricos, el sistema inmunitario, estimulado por la vacuna, mantiene controlado el virus de forma parcial (remisión parcial y remisión parcial temporal) o completa (curación funcional). Hasta la fecha, este tipo de vacunas solo han logrado la remisión parcial de la infección.

Cuando el VIH infecta a un organismo causa una disfunción del sistema inmunitario que, con el tiempo, termina en sida. Esta inmunodeficiencia obliga al paciente a tomar antirretrovíricos de por vida. Las vacunas terapéuticas tratan de invertir este proceso mediante la estimulación de una respuesta específica frente al VIH, que evita el uso crónico de medicación. Se logra con ello la curación funcional del paciente.

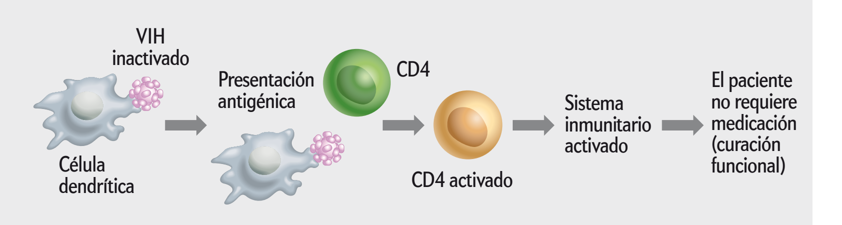
Respuesta inmunitaria normal
Cuando un antígeno entra en el organismo, lo reciben las células dendríticas. Estas lo procesan, maduran y migran de las mucosas o la piel al ganglio linfático. Allí presentan el antígeno a los linfocitos CD4 y CD8, que se activan. Ello estimula la respuesta inmunitaria específica que acabará con el germen.

Antígeno
Célula dendrítica
Presentación antigénica
CD4
CD4 activado
Sistema inmunitario activado

Infección por VIH:
Supresión de la respuesta inmunitaria
Cuando ocurre una infección por VIH, las células dendríticas se convierten en auténticos caballos de Troya, puesto que cuando migran al ganglio linfático portan los virus viables directamente a su diana, los linfocitos T CD4. Al ser estos los coordinadores del sistema inmunitario, su infección provoca una disfunción que termina en sida. Al quedar inoperativa la respuesta inmunitaria, los antirretrovíricos deben tomarse de por vida.



Vacunas terapéuticas:
Refuerzo de la respuesta inmunitaria
Al administrar al paciente una vacuna fabricada a partir de VIH inactivados y sus propias células dendríticas, estas presentan el antígeno a las células CD4 sin infectarlas, por lo que se activa correctamente el sistema inmunitario. Ello permite controlar el virus una vez interrumpido el tratamiento con antirretrovíricos.



general, la capacidad de estas vacunas para aumentar las respuestas específicas frente al VIH fueron muy limitadas y los resultados respecto al control de la replicación vírica descorazonadores. Tras estas primeras experiencias se pasó a considerar nuevos candidatos, como las vacunas basadas en ADN y las que utilizan vectores víricos o células dendríticas.

Las células dendríticas son las células procesadoras y presentadoras de antígenos más potentes, con una capacidad única de inducir respuestas inmunitarias primarias y secundarias tanto en los linfocitos CD4 como CD8. Numerosos estudios han mostrado que estas células son capaces de reaccionar frente a una gran variedad de estímulos (proteínas solubles endógenas, lisados de células tumorales, virus inactivados y células infectadas en proceso de apoptosis); asimismo, pueden presentar antígenos no solo a las células CD4 coadyuvantes a través del sistema mayor de histocompatibilidad de clase II, sino también a las células CD8 asesinas a través del sistema mayor de histocompatibilidad de clase I, en un fenómeno de presentación cruzada.

El cultivo en el laboratorio de otras células del sistema inmunitario, los monocitos, con diversas moléculas como la interleucina 4 y el factor estimulante de colonias de granulocitos y macrófagos, las transforma en células dendríticas de tipo mieloide inmaduras que, una vez entran en contacto con antígenos y con otros factores coestimulatorios, adoptan ya su forma madura final. Cuando se inoculan en ratones, estas células inducen respuestas CD8 y frenan el crecimiento de tumores. Además, células dendríticas mieloides derivadas de monocitos puestas en contacto (en el laboratorio) con patógenos inactivados presentan la capacidad de inducir potentes respuestas inmunitarias específicas frente a modelos de infecciones humanas cuando son inyectadas en ratones. Todos estos datos indican que estas células dendríticas generadas *in vitro* pueden ser el más potente coadyuvante celular para una vacuna que se proponga inducir respuestas tanto T CD4 como CD8 frente a tumores e infecciones intracelulares.

Se han realizado al menos diez ensayos clínicos de inmunoterapia con células dendríticas mieloides derivadas de monocitos para casos de infecciones por VIH en humanos. La mayoría han demostrado que estas vacunas son capaces de inducir respuestas específicas frente al VIH *de novo*. En un estudio publicado por nuestro grupo el año pasado en *Journal of Infectious Diseases* demostramos también que este tipo de vacuna era segura. Los pacientes que la recibieron mostraron una reducción notable (unas tres veces) del número de copias de virus en sangre respecto al grupo de control, al que se le administró un placebo. Además, la caída en la multiplicación vírica se asoció a un incremento de las respuestas inmunitarias específicas frente a VIH inducidas por la vacuna, lo que sugería que eran estas respuestas las responsables del control de la viremia. Sin embargo, en ninguno de los pacientes de este u otro ensayo se observó que la vacuna consi-

guiera el bloqueo total del virus (curación funcional).

Pese a los prometedores resultados de las versiones basadas en células dendríticas, la eficacia de las vacunas terapéuticas ha sido, pues, modesta. Debemos redoblar nuestros esfuerzos para entender mejor los mecanismos de protección, el control de la replicación vírica y el deterioro inmunitario provocado por la infección. Sin estos conocimientos, será difícil encontrar una vacuna terapéutica capaz de conseguir la curación funcional. Y dados los problemas asociados a la medicación antirretrovírica, la investigación en vacunas terapéuticas debe seguir siendo una prioridad.

—Felipe García Alcaide
Servicio de enfermedades infecciosas
Hospital Clínico-HIVACAT
Universidad de Barcelona

MATERIALES

Nuevos estados marginales

Los medios granulares pueden comportarse como un sólido o como un líquido. En la frontera entre ambos estados, despliegan un comportamiento no lineal de sorprendente riqueza

Todo lo que nos rodea se desmorona. La espuma de un capuchino parece sólida, pero, si la revolvemos un poco, cambiará de forma irreversiblemente. Cuando caminamos por la playa, la arena se comporta como un sólido, pero al vaciarla de los zapatos su comportamiento se asemeja más al de un líquido. Estos ejemplos indican que la mecánica de los materiales blandos desordenados puede entenderse en términos de estados *atascados*, similares a los de un sólido, o *desatascados*, aquellos en los que el material fluye con libertad. En fecha reciente, sin embargo, Dapeng Bi, de la Universidad Brandeis, y sus colaboradores han demostrado que dichos materiales pueden adoptar, además, otras configuraciones.

El comportamiento híbrido de la arena y las espumas ha fascinado a los físicos desde hace decenios. Este queda plasmado en un diagrama de fases propuesto en 1998 por Andrea Liu y Sidney Nagel, el cual parte de la idea de que el estado mecánico de una gran variedad de materiales (como medios granulares, pastas, espumas y emulsiones) se encuentra determinado por la densidad del empaquetamiento de sus constituyentes (granos, burbujas o gotas). Un empaquetamiento compacto se encontrará atascado; una disposición suelta se considera desatascada, y, cuando las partículas que constituyen el material apenas se tocan, decimos que se trata de un estado marginal. Pensemos en la mayonesa, una emulsión de pequeñas gotas de aceite en un medio acuoso. Solo tras añadir el aceite suficiente, las gotas comenzarán a tocar-

FÍSICA CUÁNTICA

Cómo crear fotones a partir del vacío

Un experimento logra la primera demostración del efecto Casimir dinámico, la extracción de fotones del vacío cuántico, gracias a un circuito superconductor que simula un espejo en movimiento

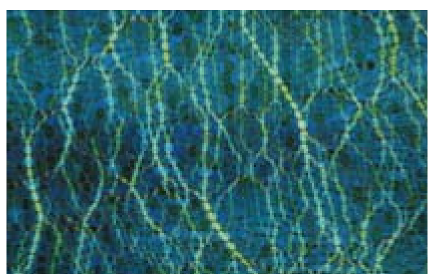
Según la mecánica cuántica, el vacío es un medio dinámico repleto de partículas virtuales que aparecen y desaparecen continuamente. Tales fluctuaciones dan lugar a fenómenos medibles. Uno de ellos, conocido desde mediados del siglo pasado, es el efecto Casimir, provocado por la presión que los fotones virtuales del vacío ejercen sobre un cuerpo estático [*véase* «El efecto Casimir», por E. Elizalde; Investigación y Ciencia, marzo de 2009]. En 1970, Gerald Moore predijo que un objeto en movimiento acelerado debería crear pares de fotones reales a partir de las fluctuaciones cuánticas del vacío, proceso que ha dado en llamarse «efecto Casimir dinámico». El pasado mes de noviembre, Christopher M. Wilson, de la Universidad de Tecnología Chalmers de Gotemburgo, y sus colaboradores publicaban en la revista *Nature* la primera demostración experimental del fenómeno.

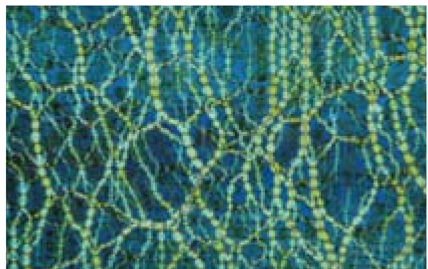
Como cabe esperar a partir del principio de conservación de la energía, la extracción de fotones del vacío cuántico requiere una contrapartida: en este caso, los fotones se generan a expensas de la disipación de la energía cinética del cuerpo en movimiento. En su versión original, el efecto Casimir dinámico consideraba un espejo acelerado. Después, la predicción se generalizó para incluir configuraciones mucho más eficientes en la creación de fotones; por ejemplo, cavidades formadas por dos espejos paralelos, uno de los cuales oscila con el tiempo.

La detección del efecto Casimir dinámico inducido por sistemas mecánicos móviles entraña una gran dificultad, puesto que la energía disipada y la radiación asociada resultan ínfimas. Para obtener resultados apreciables, los espejos habrían de desplazarse a velocidades cercanas a las de la luz. A fin de sortear este obstáculo, se han propuesto sistemas alternativos cuyos efectos simulen los de un espejo en movimiento, como medios ópticos no lineales cuyo índice de refracción varíe con gran rapidez, o membranas semiconductoras cuya conductividad sea modulada de manera periódica por un láser.

El experimento del Wilson y sus colaboradores se basa en una guía de ondas que posee, en uno de sus extremos, un circuito superconductor de interferencia cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés), un dispositivo que actúa como un magnetómetro de gran precisión. Un flujo magnético variable atraviesa el SQUID y modifica el campo electromagnético en el interior de la guía de ondas, del mismo modo en que lo haría un espejo móvil que ocupase el lugar del SQUID. Dado que no hay ningún espejo mecánico que desplazar, la velocidad efectiva del espejo ficti-

Estados frágiles y estados atascados por cizalla: los investigadores sometieron a cizalladura un material granular compuesto por una mezcla de discos de plástico de 0,74 y 0,86 centímetros de diámetro. Para pequeñas cizalladuras, el material se torna frágil y los discos entran en contacto, sobre todo, a lo largo de una misma dirección (*izquierda*). Para cizalladuras mayores, el material adopta un estado atascado, en el que los discos se tocan a lo largo de varias direcciones. La intensidad de la luz en cada disco es proporcional a la presión que experimenta.





J. ZHANG & R. BEHRINGER, UNIVERSIDAD DE DUKE

se y la salsa adquirirá la consistencia adecuada.

Los resultados de Bi y sus colaboradores, publicados en *Nature* en diciembre del año pasado, sugieren que esa descripción debería revisarse para incluir una variedad más amplia de estados. En su experimento, colocaron un material granular compuesto por pequeños discos de plástico en un recipiente de paredes móviles que permitía comprimir el agregado o cizallarlo (deformarlo sin comprimirlo). Los discos eran fotoelásticos, lo que hacía posible visualizar las fuerzas que actuaban entre ellos cuando el material se sometía a una deformación: a mayores presiones, más luz atravesaba los discos.

Los investigadores analizaron la respuesta del material ante cizalladuras. Por lo general, cuando untamos mayonesa sobre una rebanada de pan, extendemos espuma de afeitar sobre la piel o derribamos de un puntapié un castillo de arena, desatascamos el material. Pero, al cizallar a volumen constante un conjunto de discos sueltos, los autores observaron un aumento de presión que se oponía a la deformación: en otras palabras, el material se tornaba rígido. Este fenómeno recuerda al principio de dilatancia de Reynolds, según el cual un material granular se expande cuando sufre un esfuerzo de cizalla a presión constante. Una conocida manifestación de dicho efecto nos la proporcionan las pisadas sobre la arena húmeda, que parecen secar la superficie circundante. Ello se debe a que, al aumentar el espacio entre los granos, el agua de la superficie puede ser absorbida hacia el interior.

A continuación, los investigadores trataron de determinar la naturaleza de esos estados en los que la rigidez mecánica aparecía como consecuencia de la cizalladura. Dichos estados resultaron ser anisótropos, como mostraban las alineaciones de discos brillantes (aquellos que soportaban presiones mayores). Para una anisotropía moderada, el material parecía encontrarse totalmente atascado; lo bastante rígido como para resistir deformaciones en cualquier dirección. Pero, ante una anisotropía elevada, el empaquetamiento se tornaba frágil: los discos entraban en contacto, sobre todo, a lo lar-

cio puede alcanzar una fracción sustancial de la velocidad de la luz.

Sin embargo, a cualquier temperatura finita existen fotones debido a los efectos térmicos, por lo que resulta necesario distinguir estos de los generados por el efecto Casimir dinámico. A fin de recrear una configuración muy próxima al estado de vacío, con un número ínfimo de fotones térmicos, los investigadores enfriaron el montaje a temperaturas extremadamente bajas (inferiores a 50 milikélvins). Después, «bombearon» un flujo magnético variable a través del SQUID y, por último, midieron la intensidad y la frecuencia de la radiación generada en el extremo abierto de la guía de ondas.

Wilson y sus colaboradores detectaron una radiación de microondas cuyo espectro mostraba un perfil simétrico en torno a la mitad de la frecuencia de oscilación del espejo ficticio. Un espectro tal concuerda con lo predicho por el efecto Casimir dinámico, pues, según este, los fotones emergen del vacío en parejas y la suma de sus frecuencias debe igualar a la frecuencia de oscilación del espejo. También la relación entre la intensidad de los fotones detectados y la amplitud del bombeo se asemejaba a la predicha por la teoría. Aparte de observar la creación de fotones reales, los autores midieron las correlaciones existentes entre ellos. A tal fin, dividieron la señal detectada a la salida de la guía en dos cadenas de análisis. Las correlaciones observadas confirmaban la naturaleza cuántica del proceso de generación de fotones y se ajustaban a otro rasgo distintivo del efecto Casimir dinámico.

Asimismo, los investigadores descartaron que la creación de fotones se debiese a otros procesos espurios. Por ejemplo, ciertos efectos no lineales presentes en la guía de ondas, en el dispositivo SQUID o en ambos podrían haber inducido la creación de fotones por medio de un fenómeno conocido como «conversión paramétrica descendente». Al respecto, los autores adujeron que la potencia de bombeo era mucho menor que la requerida para desencadenar tal efecto. Por último, y aun en la ausencia de mecanismos no lineales engañosos, cabía la posibilidad de que los fotones se debiesen al ruido experimental (como, por ejemplo, el ruido térmico). A fin de comprobar si era el caso, los investigadores midieron el flujo de fotones a la salida de la guía de ondas a dos temperaturas distintas (50 y 250 milikélvins), tras lo cual comprobaron que la señal se hallaba dominada por fluctuaciones de origen cuántico, no térmico.

Sin duda, la demostración experimental del efecto Casimir dinámico supone un gran avance cuyas consecuencias afectarán a varios ámbitos de la física fundamental. Entre otras cuestiones, el efecto permitirá estudiar en el laboratorio la creación de partículas en un universo en expansión, o la radiación de Hawking de los agujeros negros.

—Diego A. R. Dalvit
División teórica del Laboratorio Nacional de Los Álamos, Nuevo México, EE.UU.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 479, págs. 303-304, noviembre de 2011. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2011

go de una misma dirección. Los empaquetamientos frágiles pueden resistir la deformación en algunas direcciones, pero no en otras. Este comportamiento indica que no se encuentran en un estado totalmente atascado, pero tampoco en uno desatascado.

Para explicar sus hallazgos, los autores propusieron una modificación del diagrama de fases de Liu y Nagel. Además de las áreas correspondientes a los estados atascados y desatascados, debería existir una región intermedia para los estados frágiles, así como para los estados atascados por cizalla. Todos ellos deberían confluir en un punto, denominado punto marginal, en el que la rigidez se desvanece.

El nuevo diagrama propuesto por los autores persigue describir los medios granulares con fricción. Sin embargo, la existencia de estados frágiles, sumamente sensibles a las perturbaciones y cercanos a un punto marginal, constituye un fenómeno mucho más general. Numerosos materiales blandos (los medios granulares, las emulsiones, las espumas y las redes de polímeros, entre otros) pueden llevarse a un estado de rigidez mínima en el que exhiben un comportamiento marginal. Ya se conocen varios casos que demuestran que la respuesta mecánica de los materiales marginales se torna extremadamente no lineal. Cuanto más se acercan al punto marginal, tanto menor resulta la fuerza necesaria para acceder al régimen no lineal. Y, justo en dicho punto, la mínima perturbación desencadena una respuesta no lineal en absoluto.

Un ejemplo tal nos lo proporciona una red de muelles dispuestos al azar. El estado marginal se alcanza cuando, en promedio, la cantidad de muelles dobla el número de nodos en la red. Tales redes son blandas si constan de pocos muelles, pero se tornan rígidas conforme se van añadiendo más, siempre y cuando la presión se mantenga relativamente baja. Entre ambos regímenes existe una zona de respuestas extremas: cuando el sistema se encuentra en las proximidades del estado marginal, su comportamiento se vuelve completamente no lineal.

Otro ejemplo proviene de los flujos de espumas y suspensiones coloidales blandas. Ante esfuerzos moderados, exhiben un comportamiento similar al de un líquido si la densidad es baja, y parecido al de un sólido en el caso de densidades elevadas. Entre ambos estados surge un régimen intermedio, no lineal. Un efecto parecido se observa también en las ondas en medios granulares. A altas presiones, aparecen ondas elásticas lineales, pero cuando la presión es baja y el material se aproxima al punto marginal, incluso el más leve roce genera ondas de choque no lineales.

El trabajo de Bi y sus colaboradores pone de relieve la exuberancia de la física no lineal que rige la materia blanda marginal. La manifestación más simple de este comportamiento aparece en la vecindad del punto marginal; en muchos casos, sin embargo, aún se desconoce qué ocurre cuando dichos materiales se someten a esfuerzos.

—Vincenzo Vitelli
Instituto Lorentz
y Universidad de Leiden

—Martin van Hecke
Laboratorio Kamerlingh Onnes
y Universidad de Leiden

ALTAS ENERGÍAS

¿Ha muerto la supersimetría?

La teoría aún conserva un lugar privilegiado en la lista de deseos de los físicos teóricos. Pero si el LHC no halla pronto indicios de su existencia, el interés por ella comenzará a desvanecerse

Desde hace décadas, una buena parte de los físicos teóricos viene acariciando la idea de que la naturaleza sea supersimétrica. Ello resolvería de un plumazo varios misterios que escapan al modelo estándar, como la composición de la materia oscura cósmica. Desde hace unos meses, sin embargo, algunos comienzan a no verlo tan claro: el acelerador de partículas más potente de la historia, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, no ha mostrado hasta el momento indicio alguno de su existencia.

«Busquemos donde busquemos, no vemos ninguna desviación con respecto a las predicciones del modelo estándar», explica Giacomo Polesello, físico del Instituto Nacional de Física Nuclear de Pavía y miembro de la colaboración ATLAS, que trabaja con uno de los gigantescos detectores de partículas del LHC. El otro gran experimento del acelerador, CMS, tampoco ha observado hasta ahora nada fuera de lo normal.



ALICE, uno de los detectores del LHC.

CORTESÍA DE MAXIMILIEN BRICE, CERN

La supersimetría nació en los años setenta con el objetivo de esbozar una descripción unificada de los dos grandes grupos de partículas que existen en la naturaleza: fermiones y bosones. Entre los primeros se cuentan todas las partículas de materia, como los electrones o los quarks; a los segundos pertenecen las partículas encargadas de transmitir las interacciones fundamentales, como el fotón. La supersimetría predice que, por cada uno de los fermiones que conocemos, debería existir un *supercompañero* bosónico y de mayor masa. Y viceversa: cada bosón del modelo estándar habría de poseer un análogo fermiónico, pero más pesado. «Se trata del siguiente paso

hacia una visión del universo en la que todo es bello y simétrico», apunta Michael Peskin, del Acelerador Lineal de Stanford.

En principio, las elevadas energías que se alcanzan en el LHC deberían bastar para producir algunas de las partículas predichas por los modelos supersimétricos. En el acelerador colisionan haces de protones con una energía de 4 teraelectronvoltios (TeV) cada uno. Esa cifra resulta 4000 veces mayor que la energía contenida en la masa de un protón, por lo que cada choque cuenta con un buen excedente de energía para generar nuevas partículas. Pero, por el momento, la naturaleza no parece querer cooperar: si las partículas supersimétricas existen, su masa ha de ser mayor de lo que creían los físicos. «Hasta ahora hemos descartado una serie de modelos "sencillos" cuyas predicciones deberían haberse mostrado de inmediato», explica Polesello. Ian Hinchliffe, del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley, matiza: «La cantidad de partículas y masas posibles que hemos excluido es enorme».

La mayoría de los físicos teóricos no parece mostrar una preocupación excesiva. Como explica Peskin, existe una gran variedad de modelos supersimétricos viables y compatibles con los resultados nulos obtenidos hasta ahora. A tenor de Joseph Lykken, teórico de la colaboración CMS, pretender observar física más allá del modelo estándar tras solo un año de colisiones peca de ingenuo. Pero, para que la supersimetría resuelva los problemas para los que fue concebida, algunas de las partículas predichas por ella no deberían ser demasiado pesadas. La masa de los supuestos constituyentes de la materia oscura, por ejemplo, no debería exceder unas décimas de TeV.

Pero la razón principal para pensar que las partículas supersimétricas deberían aparecer pronto en el LHC se debe al bosón de Higgs. Todas las partículas elementales que poseen masa la adquieren como consecuencia de su interacción con el campo de Higgs, el cual llena todo el espacio. No obstante, a su masa contribuyen también las interacciones con las partículas virtuales que componen el vacío cuántico. En la mayoría de los casos, las simetrías del modelo estándar garantizan que dichas aportaciones se cancelen unas a otras, por lo que solo contribuyen a una pequeña fracción de la masa total de cada partícula.

Por ironías del destino, la excepción a esa regla la constituye el propio bosón de Higgs: si su masa se calcula según las reglas del modelo estándar, las correcciones cuánticas no solo no se cancelan, sino que implican que su masa debería ser infinita. Pero ese problema desaparecería si la naturaleza fuese supersimétrica: en tal caso, al añadir las contribuciones debidas a las versiones virtuales de las partículas supersimétricas, la masa del bosón de Higgs se mantiene en un valor finito. En diciembre del año pasado, el LHC presentó resultados que parecían indicar que la masa del Higgs rondaría los 0,125 TeV [*véase* «¿Está la partícula de Higgs asomando la cabeza?», por Alberto Casas; Investigación y Ciencia, febrero de 2012]. Ese valor resulta compatible con las predicciones de los modelos supersimétricos; pero, para que todo funcione, las partículas supersimétricas no pueden ser demasiado pesadas. Entonces, ¿por qué no aparecen?

Una explicación alternativa podría residir en las simetrías que ya posee el modelo estándar, las cuales, por medio de un mecanismo sutil pero subestimado hasta ahora, mantendrían finita la masa del bosón de Higgs. Esta idea fue propuesta el año pasado Bryan Lynn, físico teórico del Colegio Imperial de Londres. Otros, sin embargo, creen que dicha posibilidad no resolvería el misterio sino de manera parcial, lo que aún dejaría un amplio hueco para la existencia de física más allá del modelo estándar. Otra salida del atolladero, propuesta hace un tiempo, aparecería si el bosón de Higgs no fuese una partícula elemental, sino que se hallase compuesto por otras, tal y como los protones se componen de quarks. Por desgracia, el LHC aún no dispone de datos suficientes para confirmar o refutar esta idea. Verificar otras opciones más exóticas, como la existencia de dimensiones espaciales adicionales a las tres que conocemos, puede que quede para siempre fuera del alcance del LHC.

A medida que ATLAS y CMS continúen acumulando datos, o bien comenzarán a aparecer partículas supersimétricas, o bien se excluirán más valores para sus posibles masas. Puede que el LHC jamás logre descartar por completo su existencia, pero si en el intervalo de energías accesibles al acelerador no aparece antes o después alguna de ellas, la utilidad de la teoría se desvanecerá. En tal caso, incluso algunos de sus más fervientes defensores acabarían perdiendo la fe en ella. «Lo más interesante que podríamos ver es algo en lo que nunca nadie hubiese pensado antes», sentencia Hinchliffe.

—Davide Castelvecchi



Fred H. Gage es profesor del Laboratorio de Genética del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California, donde estudia el modo en que se generan las neuronas en el cerebro.

Alysson R. Muotri es profesor del departamento de pediatría y medicina celular y molecular de la Universidad de California en San Diego. Entre los años 2002 y 2008 fue becario posdoctoral en el laboratorio de Gage.

NEUROCIENCIA

LA SINGULARIDAD DE CADA CEREBRO

¿Cómo es posible que los gemelos idénticos desarrollen personalidades distintas? En el interior de las neuronas, algunos genes se desplazan de un sitio a otro y alteran la función de estas

Fred H. Gage y Alysson R. Muotri

EN SÍNTESIS

Los genes que heredamos y los factores ambientales influyen en el comportamiento humano. En tiempo reciente, se ha descubierto que también intervienen otros procesos.

Los transposones, segmentos de ADN que se copian a sí mismos y se insertan en nuevos lugares del genoma, pueden alterar la función de genes enteros. En ocasiones activan genes adyacentes a esas posiciones. Este fenómeno, que se produce con mayor frecuencia en el cerebro que en otras partes del cuerpo, da lugar a rasgos y comportamientos distintos, incluso entre individuos estrechamente emparentados.

Los elementos transponibles pueden determinar también la predisposición de las personas a los trastornos psiquiátricos.

En la actualidad se está empezando a investigar si los transposones nos ayudan a adaptarnos a condiciones ambientales que cambian con rapidez.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN



CADA CEREBRO ES ÚNICO E IRREPETIBLE.

Las diferencias entre una persona y otra se producen en los distintos niveles de la arquitectura del órgano, increíblemente compleja. El cerebro humano contiene 100.000 millones de neuronas, de miles de tipos diversos, que en conjunto establecen más de 100 billones de conexiones entre sí. Estas diferencias dan lugar a variaciones en la forma en que pensamos, aprendemos y nos comportamos, así como en nuestra propensión a padecer enfermedades mentales.

¿Cómo surge la diversidad en las conexiones y funciones del cerebro? La variabilidad genética que heredamos de nuestros padres desempeña un papel importante. Sin embargo, incluso los gemelos idénticos criados por los mismos padres pueden diferir notablemente en su funcionamiento mental, forma de comportarse y riesgo de padecer una enfermedad mental o neurodegenerativa. De hecho, los ratones criados para ser genéticamente idénticos y que han sido tratados del mismo modo en el laboratorio muestran diferencias en su capacidad de aprendizaje, en la forma de superar temores y en las respuestas ante el estrés, incluso aunque tengan la misma edad, pertenezcan al mismo sexo y hayan recibido los mismos cuidados. Sin duda, algún otro proceso debe estar interviniendo.

Ciertamente, las experiencias que adquirimos en la vida también importan; pueden, por ejemplo, afectar la fortaleza de las conexiones entre determinados conjuntos de neuronas. Pero cada vez se descubren más indicios de que hay otros factores en juego, como los procesos que mutan genes o que modifican el comportamiento de un gen, tanto durante las fases tempranas del desarrollo del embrión como en etapas posteriores de la vida. Entre esos fenómenos cabe destacar el corte y empalme alternativo, en el que un único gen da lugar a dos o más proteínas diferentes. Las proteínas desempeñan la mayor parte de los quehaceres de la célula. Por tanto, el tipo de proteínas que esta sintetice repercutirá en el funcionamiento del tejido al que pertenezca. Se está investigando también el papel de los cambios epigenéticos, modificaciones del ADN que alteran la actividad génica (al aumentar o disminuir la síntesis de ciertas proteínas) sin que haya variado la información de los genes.

Durante los últimos años, nuestro grupo ha descubierto unos genes intrigantes que parecen operar más en el cerebro que en otros tejidos: los transposones, también conocidos como «genes saltarines». Identificados en casi todas las especies, incluidos los humanos, insertan copias de sí mismos en otras partes del genoma (la dotación completa de ADN contenida en el núcleo) y alteran el funcionamiento de la célula, que se comporta de forma distinta a las células vecinas, por lo demás idénticas a ella. Cabría esperar que si se dieran muchas de esas inserciones en múltiples células aparecerían diferencias sutiles, o no tan sutiles, en las capacidades cognitivas, los rasgos de la personalidad y la propensión a padecer trastornos neurológicos.

Nuestros primeros descubrimientos sobre la movilidad de los genes en el cerebro nos han hecho plantear otra cuestión: puesto que el funcionamiento correcto de este órgano resulta esencial para la supervivencia, ¿por qué la evolución ha hecho persistir un proceso que hace variar su programación genética? Aunque todavía no disponemos de una respuesta definitiva, cada vez más pruebas sugieren que, al inducir variabilidad en las células del cerebro, los transposones dotan a los organismos de la flexibilidad necesaria para adaptarse con rapidez a las circunstancias cambiantes. Por tanto, la evolución habría retenido estos genes móviles tal vez porque, partiendo de la base de que hay que promover la supervivencia de las especies, los beneficios de esta adaptación superan los riesgos.

INVASORES ANCESTRALES

La idea de que en el genoma existen elementos que cambian de lugar no es nueva, pero los datos recientes sobre su elevada actividad en el cerebro nos resultaron sorprendentes. La transposición de genes fue descubierta en las plantas, antes incluso de que James Watson y Francis Crick describiesen en 1953 la estructura de doble hélice del ADN. En la década de los cuarenta, Bárbara McClintock, del laboratorio de Cold Spring Harbor, observó «elementos controladores» que se desplazaban de un sitio a otro en el material genético de las plantas de maíz. Descubrió que, en condiciones de estrés, determinadas regiones del genoma migraban y, desde su nueva ubicación, activaban o desactivaban ciertos genes. McClintock obtuvo de sus experimentos las ahora bien conocidas mazorcas de maíz con granos de colores diversos, una prueba de la existencia de mosaicos genéticos. En estos, los genes de una determinada célula se activan o desactivan según una pauta distinta a la de las células vecinas que, por lo demás, son idénticas a ella. [*Véase* «Elementos genéticos transponibles del maíz», por Nina V. Fedoroff; Investigación y Ciencia, febrero de 1984.]

La investigación de McClintock, que al principio fue recibida con escepticismo por la comunidad científica, acabó recibiendo un premio Nobel en 1983. En los años posteriores quedó claro que el mosaicismo genético no se halla restringido a las plantas, sino que también tiene lugar en multitud de organismos, entre ellos los humanos.

McClintock realizó su trabajo con transposones, elementos móviles que utilizan un mecanismo de «cortar y pegar» para cambiar un segmento de ADN de un lado a otro del genoma celular. Investigaciones recientes sobre la movilidad de los genes en el cerebro se han centrado en los retrotransposones, que utilizan una estrategia de «copiar y pegar» para introducirse ellos mismos en nuevas regiones del genoma. Es decir, en lugar de desligarse del ADN adyacente, producen una copia de sí mismos que después ocupará una nueva posición.

En el genoma humano, los retrotransposones constituyen hasta la mitad de los nucleótidos, las unidades básicas con las que se construye el ADN. Por el contrario, los 25.000 genes que codifican proteínas representan menos del 2 por ciento del ADN de los mamíferos. Los elementos transponibles se derivan de los primitivos sistemas de replicación molecular que invadieron los genomas de los eucariotas (organismos formados por células con núcleo) hace mucho tiempo. En 1988, un grupo dirigido por Haig H. Kazazian Jr., en la Universidad de Pensilvania, demostró que los retrotransposones, en su momento considerados ADN redundante, eran activos en los tejidos humanos.

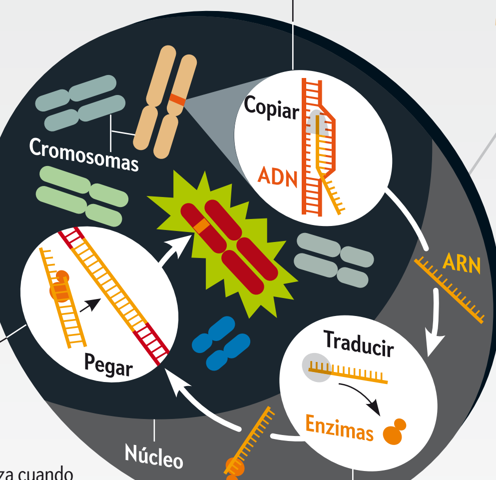
En concreto, cierto retrotransposón, el elemento intercalado largo 1 (L1), parece desempeñar un papel clave en el genoma humano. Tiene la capacidad de cambiar con frecuencia de po-

Secuencias genéticas que se «copian y pegan»

Los transposones, secuencias de ADN que resultan especialmente activas durante el desarrollo del cerebro, hacen copias de sí mismos que después se insertan en otros lugares del genoma. En su nueva ubicación no suelen provocar ningún efecto sobre los genes adyacentes, que contienen instrucciones para la síntesis de proteínas. Sin embargo, en algunos casos, activan esos genes y modifican el funcionamiento de distintas células. En última instancia, esos cambios dan lugar a diferencias en la función cerebral entre personas, incluso entre gemelos idénticos.

¿Cómo cambian de posición?

Las variaciones genéticas no heredables se producen cuando un retrotransposón (un segmento redundante del genoma) se copia a sí mismo en forma de ARN, después vuelve a copiarse en forma de ADN y se reinserta en una ubicación distinta de la inicial. Estos elementos móviles pueden desplazarse de un lado a otro en el cerebro del embrión y también del adulto. En la figura se ilustra el fenómeno en dos gemelos idénticos.



1 **La copia** tiene lugar durante la división celular, cuando una secuencia de ADN se transcribe a sí misma y genera una sola hebra de ARN que, a continuación, se dirige del núcleo al citoplasma de la célula.

2 **En el citoplasma,** una parte de la hebra de ARN se traduce en proteínas ayudantes. La hebra de ARN original y las proteínas recién formadas se unen y, a continuación, retornan al núcleo celular.

3 **El pegado** comienza cuando el ARN hace una copia del ADN original y este, a continuación, se inserta en un nuevo lugar del genoma después de que una proteína realice una incisión en un cromosoma.

4 **Tras la transposición** puede que se active un gen adyacente. En el embrión, este proceso tiene lugar en el prosencéfalo y también en otras zonas. En el adulto, solo sucede en el hipocampo y en las escasas regiones que contienen células progenitoras de las neuronas.

Resultado: Gemelos no idénticos

Incluso cuando los gemelos se originan del mismo óvulo, los transposones pueden generar una pauta de activación génica distinta entre ambos y, por tanto, cerebros diferentes.

JEN CHRISTIANSEN

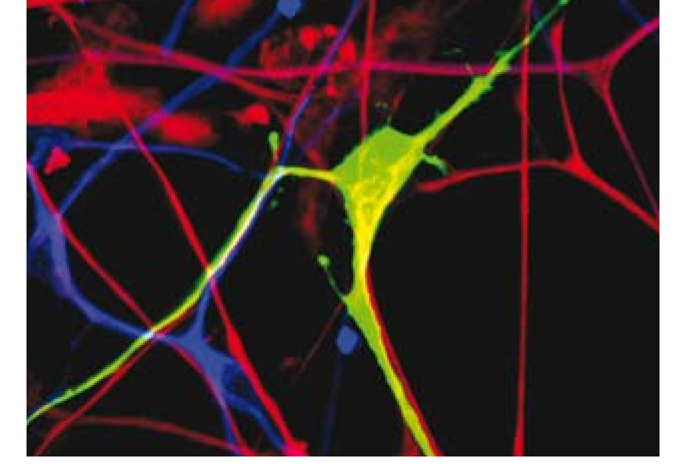
sición tal vez porque, a diferencia de otros elementos móviles humanos, codifica su propia maquinaria para esparcir copias de sí mismo por todo el genoma. El análisis de su comportamiento en la célula pone de manifiesto que cuando algún hecho promueve el inicio de la transposición de L1, este se transcribe primero a sí mismo en forma de una hebra sencilla de ARN que, posteriormente, se desplaza desde el núcleo hacia el citoplasma, donde actúa como molde para sintetizar las proteínas especificadas por algunas regiones del ADN de L1. A continuación, las proteínas forman un complejo molecular con el ARN todavía intacto y ese complejo regresa al núcleo. Una vez allí, una de las proteínas, la enzima endonucleasa, realiza un corte en ciertos lugares del ADN. También utiliza el ARN como molde para producir una copia del ADN de doble hebra del retrotransposón L1 original y, a continuación, inserta ese duplicado en el lugar del genoma donde se ha realizado el corte. Hoy en día, la transcripción inversa de ARN a ADN representa un mecanismo bien conocido, ya que es el que utiliza el virus VIH para obtener una copia de ADN a partir de su genoma de ARN y conseguir así un hogar permanente en el genoma de las células que infecta.

Con frecuencia, la retrotransposición sigue su curso normal, con lo que se generan copias truncadas, no funcionales, del ADN original de L1. A veces, este fenómeno carece de efecto, pero en otros casos acarrea una serie de consecuencias, positivas o negativas, que modifican el destino de una célula. Pueden insertarse en la región codificante de un gen y, de este modo, alterarla. Tal maniobra origina una nueva variante de la proteína que favorece o perjudica al organismo. O quizá la nueva ubicación detiene la síntesis de una proteína concreta. En otros casos, el ADN se inserta en una región no codificante pero que actúa como promotor (un interruptor que puede activar genes cercanos); ello altera el nivel de expresión génica (la cantidad de proteína fabricada a partir del gen), lo que también puede ejercer un efecto positivo o negativo en la célula y el organismo. Cuando los retrotransposones L1 ocupan numerosos sitios en las neuronas o afectan a muchas de ellas, el cerebro resultante será muy distinto del que se habría formado sin estos cambios. Es evidente que ese mosaico genético podría modificar el comportamiento, la cognición y el riesgo de padecer enfermedades. También ayudaría a explicar por qué un gemelo permanece sano mientras que el otro sufre esquizofrenia.

¿A QUÉ CÉLULAS AFECTA?

Hasta hace poco, se daba por sentado que la retrotransposición de L1 se producía sobre todo en las células germinales (óvulos y espermatozoides). Aunque algunos datos sugerían que los genes L1 permanecían activos en los tejidos somáticos (células no sexuales) durante las etapas tempranas del desarrollo e incluso más tarde, tales indicios solían descartarse. Si el propósito de los genes es perpetuarse a sí mismos, tal y como sostiene una teoría evolutiva, los transposones tendrían pocos motivos para permanecer activos en células somáticas, porque estas no transmitirían el ADN a la descendencia del organismo: después de todo, las células afectadas mueren cuando lo hace su propietario.

Las nuevas técnicas de detección han revelado ahora que los retrotransposones se desplazan de un tejido a otro durante las etapas iniciales del desarrollo e incluso en etapas posteriores de la vida. Tales eventos se producen más a menudo en el cerebro que en otros tejidos, lo que desafía el antiguo dogma de que en los adultos los códigos genéticos de las neuronas son idénticos entre sí y permanecen estables.



Transposición de un gen: **En una neurona, el desplazamiento de ADN y su inserción en otra ubicación en el núcleo celular da lugar a una nueva proteína que se identifica por su color verde brillante.**

DE «L1 RETROTRANSPOSITION IN HUMAN NEURAL PROGENITOR CELLS», POR NICOLE G. COUFAL ET AL., EN *NATURE*, VOL. 460, 27 DE AGOSTO DE 2009

En nuestro laboratorio, examinamos las células de un ratón que se habían modificado genéticamente para que llevasen a cabo la retrotransposición y emitiesen fluorescencia verde cada vez que un elemento L1 se insertaba en el genoma de cualquier célula de su organismo. Solo observamos luz verde brillante en las células germinales y en determinadas partes del cerebro, entre ellas el hipocampo (una región importante para la memoria y la atención), lo que sugiere que los L1 se desplazan en el cerebro con mayor frecuencia que en otros tejidos somáticos. Curiosamente, el cambio de posición se producía en las células progenitoras que dan lugar a las neuronas del hipocampo.

En varios órganos de los organismos adultos, una pequeña población de células progenitoras permanece en espera, lista para dividirse y dar lugar a tipos celulares especializados que reemplazan a las que mueren. El hipocampo constituye una de las dos regiones del cerebro donde se produce la neurogénesis, la generación de nuevas neuronas. Los L1 parecen mostrarse activos durante las primeras etapas del desarrollo, cuando las neuronas se están formando, pero también lo hacen en el cerebro adulto, en las zonas donde se originan nuevas neuronas.

A pesar de los experimentos con ratones, se necesitaban más pruebas sobre la existencia de retrotransposición en el cerebro. Llevamos a cabo un análisis post mórtem en humanos para comparar el número de elementos L1 en tejidos del cerebro, corazón e hígado. Descubrimos que los núcleos celulares del tejido cerebral contenían muchos más elementos L1 que los del tejido cardíaco o hepático.

La mayoría de los desplazamientos de genes debían haber sucedido durante el desarrollo del cerebro, porque la retrotransposición requiere que haya división celular después de las primeras etapas de la infancia, un proceso que no ocurre en el cerebro, salvo en dos áreas restringidas. Un análisis sugería que todas las neuronas humanas experimentaban por término medio unos 80 episodios de integración de L1, una cifra que conllevaría un elevado grado de variación no solo entre células, sino también en la actividad cerebral de distintos individuos.

En tiempo reciente, investigadores del Instituto Roslin, cerca de Edimburgo, y sus colaboradores confirmaron la actividad de L1 en el cerebro humano. En 2011, el grupo publicó en la revista *Nature* que un total de 7743 inserciones de L1 en el hipocampo y en el núcleo caudado (que también interviene en la memoria) de tres individuos fallecidos contenían elementos L1 integrados. El estudio insinuaba que, a medida que avanzasen las investigaciones, la noción que se tenía acerca de la diversidad genética del cerebro se iría complicando aún más. El equipo de

Roslin se sorprendió al descubrir unos 15.000 miembros de ciertos retrotransposones, los elementos intercalados cortos (SINE, por sus siglas en inglés). Los SINE predominantes, que forman parte del grupo de los elementos Alu, nunca se habían identificado antes en el cerebro.

Nuestros hallazgos nos hicieron preguntarnos qué factor podría desencadenar la actividad de L1. Como sabíamos que en el hipocampo tiene lugar la neurogénesis, y que la exposición a situaciones novedosas y el ejercicio físico desencadenan la neurogénesis en ratones, decidimos comprobar si el ejercicio podría estimular la transposición de genes. Tras hacer que nuestros ratones transgénicos corriesen en una rueda sin fin, observamos que el número de células fluorescentes verdes en el hipocampo de los roedores casi se duplicaba. Como la novedad y los desafíos también promueven la neurogénesis, estamos considerando la posibilidad de que un entorno nuevo o desconocido constituya otro factor que favorezca la retrotransposición.

Si nos hallamos en lo cierto y se van produciendo nuevos desplazamientos de L1 a medida que el sistema nervioso aprende y se adapta al mundo exterior, el descubrimiento indicaría que el cerebro y el entramado neuronal que forma parte de él está cambiando sin cesar y se altera con cada nueva experiencia, incluso en gemelos idénticos.

ORIGEN DE LA ENFERMEDAD

Además de contar el número de L1 en el ADN, estamos obteniendo otros datos que refuerzan la hipótesis de que los transposones contribuyen a la diversidad del cerebro humano. Al intentar relacionar nuestros hallazgos con sucesos reales acerca del efecto positivo o perjudicial de los transposones en personas vivas, resulta a veces más sencillo señalar las consecuencias negativas, sencillamente porque suelen ser muy evidentes.

En noviembre de 2010 nuestro equipo publicó en *Nature* que una mutación en el gen *MeCP2* afectaba la retrotransposición de L1 en el cerebro. Las mutaciones en ese gen pueden inducir el síndrome de Rett, un grave trastorno del desarrollo del cerebro que afecta casi exclusivamente a las niñas. El descubrimiento de la mutación *MeCP2* en pacientes con síndrome de Rett y con otras enfermedades mentales generó multitud de preguntas en torno a los mecanismos moleculares y celulares de esa dolencia. Nuestra investigación demostró que la mutación en el cerebro de ratones y humanos con síndrome de Rett daba lugar a un mayor número de inserciones L1 en las neuronas, un hallazgo que sugiere que los transposones podrían explicar algunos de los efectos de la mutación de *MeCP2*.

La actividad de L1 se ha observado también en otras enfermedades. Un análisis de la corteza frontal de individuos con esquizofrenia reveló que estos presentaban más secuencias de elementos móviles que las personas sin el trastorno. Algunos indicios apuntan que los elementos L1 son un componente importante de varias enfermedades cerebrales, entre las que se incluye el autismo. Entender el papel de los transposones en los trastornos psiquiátricos podría ayudar a descubrir nuevos métodos de diagnóstico, tratamiento y prevención.

Las investigaciones en curso sobre los transposones en el cerebro podrían poner en entredicho toda una disciplina académica. Con frecuencia, los especialistas en genética conductual hacen un seguimiento de grupos de gemelos idénticos durante largos períodos de tiempo para observar los efectos de los genes y determinar la influencia del entorno en enfermedades como la esquizofrenia. El descubrimiento de que los transposones modifican los genomas después de haberse formado el embrión cuestiona la suposición de que los gemelos «idénticos» sean genéticamente iguales. De hecho, los nuevos hallazgos harán que resulte más difícil diferenciar los efectos relativos de la herencia y del ambiente sobre nuestra psique.

La pregunta sigue vigente: dado que los transposones tienden a introducir defectos genéticos potencialmente mortales, ¿por qué la evolución no ha eliminado de nuestras células esos vestigios de virus ancestrales? Para responder a esta pregunta, deberíamos tener en cuenta que los humanos hemos estado siempre sometidos al ataque de parásitos víricos y de otros invasores que aumentan el tamaño de nuestro genoma mediante la transposición de ADN. El organismo humano y el de nuestros antepasados evolutivos tal vez no hayan logrado eliminar del todo a los intrusos, pero al menos se han adaptado a convivir con ellos al silenciarlos mediante una serie de astutos mecanismos que los mutan y los inutilizan. Además, en algunos casos, parece que nuestro genoma se ha apropiado de la maquinaria genética de los retroelementos L1 para aumentar nuestra supervivencia. Esta es una de las razones por las que las células, en ocasiones, permiten o incluso fomentan la transposición de L1.

Una clave de su persistencia surge cuando se analiza la enorme variabilidad de la respuesta al estrés en los ratones de una única cepa genética criados en condiciones muy controladas. Las diferencias observadas en el comportamiento de la población siguen una distribución normal (la gráfica tiene forma de campana), lo cual significa que los mecanismos responsables de la variabilidad son aleatorios, igual que parece suceder con los lugares de inserción de los retrotransposones L1.

La naturaleza supuestamente aleatoria de los L1 en el genoma implica que la selección natural estaría echando suertes, con la esperanza de que las ventajas de las inserciones beneficiosas superaran a las perjudiciales. Y puede que la naturaleza apueste con frecuencia por las células progenitoras de las neuronas del hipocampo. De este modo se maximiza la posibilidad de que al menos alguna de las nuevas posiciones dé lugar a una población de neuronas adultas muy bien adaptada para realizar nuevas tareas.

Tal suposición no resulta del todo inverosímil. Para influir sobre el comportamiento, los efectos mediados por L1 no tienen que ser de gran alcance ni producirse en numerosas células. En los roedores, un cambio en el patrón de transmisión de impulsos en una sola neurona puede bastar para establecer diferencias.

Hay otro hallazgo que respalda esta idea. El único linaje de elementos móviles L1 actualmente activo en el genoma humano surgió hace unos 2,7 millones de años, tras la bifurcación evolutiva que dio lugar a los bípedos humanos a partir de los chimpancés, una época en la que nuestros antepasados homínidos estaban empezando a utilizar herramientas de piedra. Ese descubrimiento aporta credibilidad a la noción de que los elementos L1 habrían ayudado a construir cerebros que procesan con rapidez la información del entorno y que, por tanto, permitirían hacer frente a los desafíos impuestos por unas condiciones ambientales y climáticas en constante cambio. Los transposones L1 parecen haber contribuido a la evolución de *Homo sapiens*.

PARA SABER MÁS

L1 retrotransposition in human neural progenitor cells. Nicole G. Coufal et al. en *Nature*, vol. 460, págs. 1127-1131, 27 de agosto de 2009.

LINE-1 retrotransposons: Mediators of somatic variation in neuronal genomes? Tatjana Singer y col. en *Trends in Neurosciences*, vol. 33, n.º 8, agosto de 2010. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2916067/?tool=pubmed**

ASTROFÍSICA

EL FUTURO DE LAS ESTRELLAS

Los días de gloria del cosmos no han quedado atrás. Los próximos billones de años aún habrán de presenciar fenómenos estelares completamente nuevos

Donald Goldsmith



KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

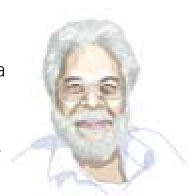
EN SÍNTESIS

A pesar de que la gran era de formación estelar ya ha concluido, nuevos procesos cósmicos aguardan al universo. En el futuro, las estrellas adquirirán otra apariencia debido a los cambios en su composición.

Los sistemas estelares y planetarios actuales se desmoronarán, pero astros que hoy en día se consideran exóticos se convertirán en moneda corriente. El universo futuro podría ser más apto para la vida que el actual.

Estudiar el futuro lejano del cosmos proporciona a los astrofísicos un banco de pruebas conceptual con el que explorar las implicaciones de sus teorías y observaciones relativas al pasado y el presente del universo.

Donald Goldsmith se doctoró en astronomía en la Universidad de California en Berkeley en 1969. Tras haber investigado en la Universidad Stanford y en la Universidad de Stony Brook, en Nueva York, actualmente se dedica a la divulgación de la astronomía. Entre otras actividades de popularización, trabajó como asesor en la serie *Cosmos*, de Carl Sagan.



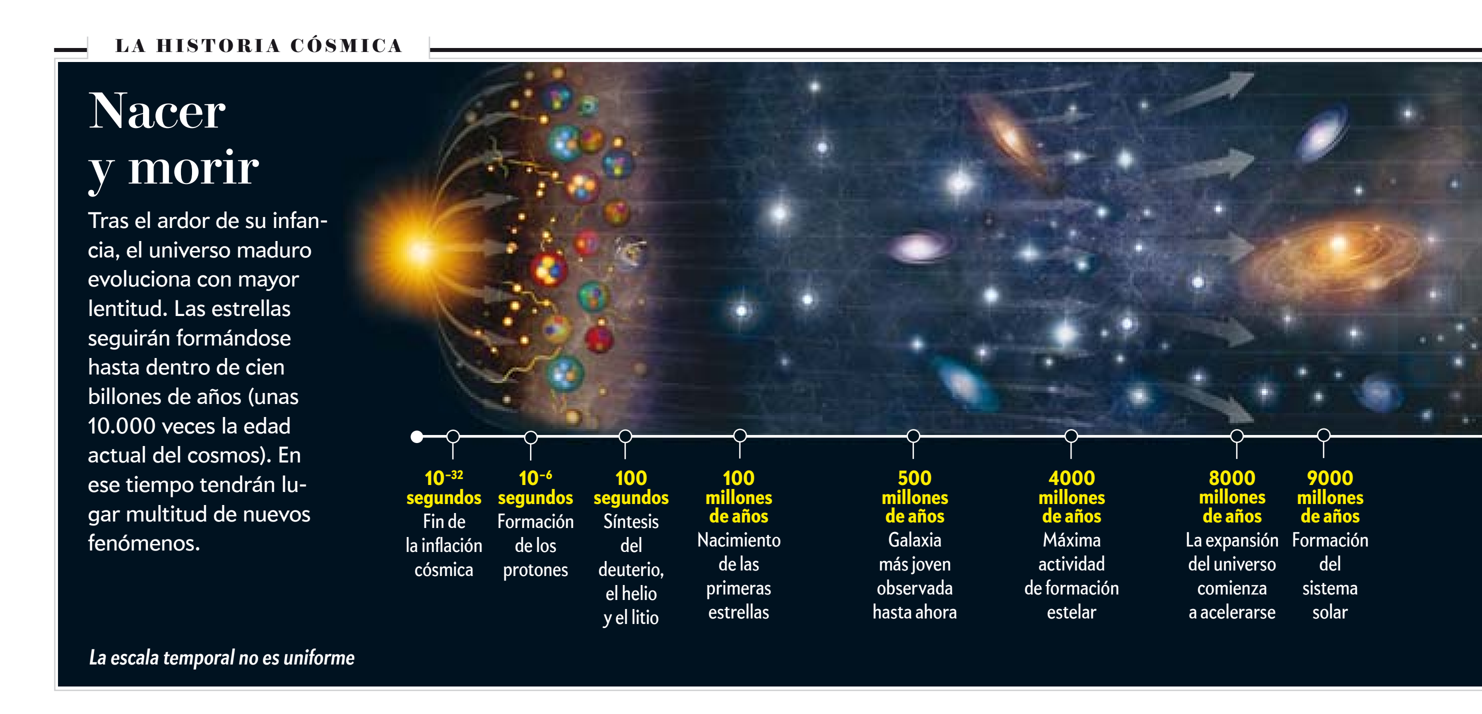
El transcurso inexorable del tiempo siempre ha despertado un gran interés sobre el destino último del cosmos. La imagen a la que más a menudo nos enfrentamos nos presenta un futuro bastante sombrío: dentro de unos 5000 millones de años, el Sol se hinchará hasta convertirse en una gigante roja y engullirá los planetas interiores del sistema solar antes de comenzar a extinguirse lentamente. Pero este pequeño intervalo temporal no representa sino una fracción insignificante de todo el camino que al universo aún le queda por recorrer. En la actualidad, la edad del cosmos se calcula en unos 13.700 millones de años. Pero, si nos adelantásemos «576.000 millones de años», tal y como proponía Douglas Adams en *El restaurante del fin del mundo*, veríamos un universo repleto de fenómenos relegados al olvido. Para entonces, la expansión acelerada del espacio habrá alejado de nuestra vista cualquier objeto ajeno a nuestra galaxia; una yerma perspectiva celestial ya aventurada por Lord Byron en 1816, en su poema *Oscuridad*: «El brillante sol se extinguía, y los astros / vagaban apagándose en el espacio eterno».

Pero hay también buenas noticias: la oscuridad que se avecina tan solo refleja la mitad de la historia. Es cierto que la formación estelar vivió su época de máximo esplendor hace largo tiempo, pero eso no significa el fin de la vida en el universo. Nuevas bestias pasarán a formar parte del zoo estelar. Fenómenos que hoy nos parecen insólitos se convertirán en moneda corriente. Y las condiciones cósmicas favorables para la aparición de vida se darán, si acaso, con mayor frecuencia que en la actualidad.

La escatología científica goza de una venerable tradición en el ámbito de la física y la cosmología. Fascinante por derecho propio, este campo nos brinda un excelente banco de pruebas conceptual para analizar nuevas teorías y una buena oportunidad para concretar algunas de las ideas más abstractas. Una de ellas, la forma del espacio, puede tornarse más comprensible si analizamos sus implicaciones con respecto al destino final del universo. Además, las teorías que intentan describir las partículas y fuerzas fundamentales de la naturaleza realizan predic-

MALCOLM GODWIN

LA HISTORIA CÓSMICA



ciones que solo podrán verificarse dentro de billones de años, como la desintegración de los protones o la evaporación de los agujeros negros. Cada vez más, los astrofísicos incluyen el futuro lejano en sus modelos de evolución estelar y galáctica. Durante el último decenio han proliferado los intentos de reconstruir las diferentes épocas de formación de estrellas y galaxias desde la gran explosión hasta nuestros días. Ese mejor conocimiento del pasado nos está permitiendo extrapolar con una precisión creciente el futuro lejano.

LUCES DEL FUTURO

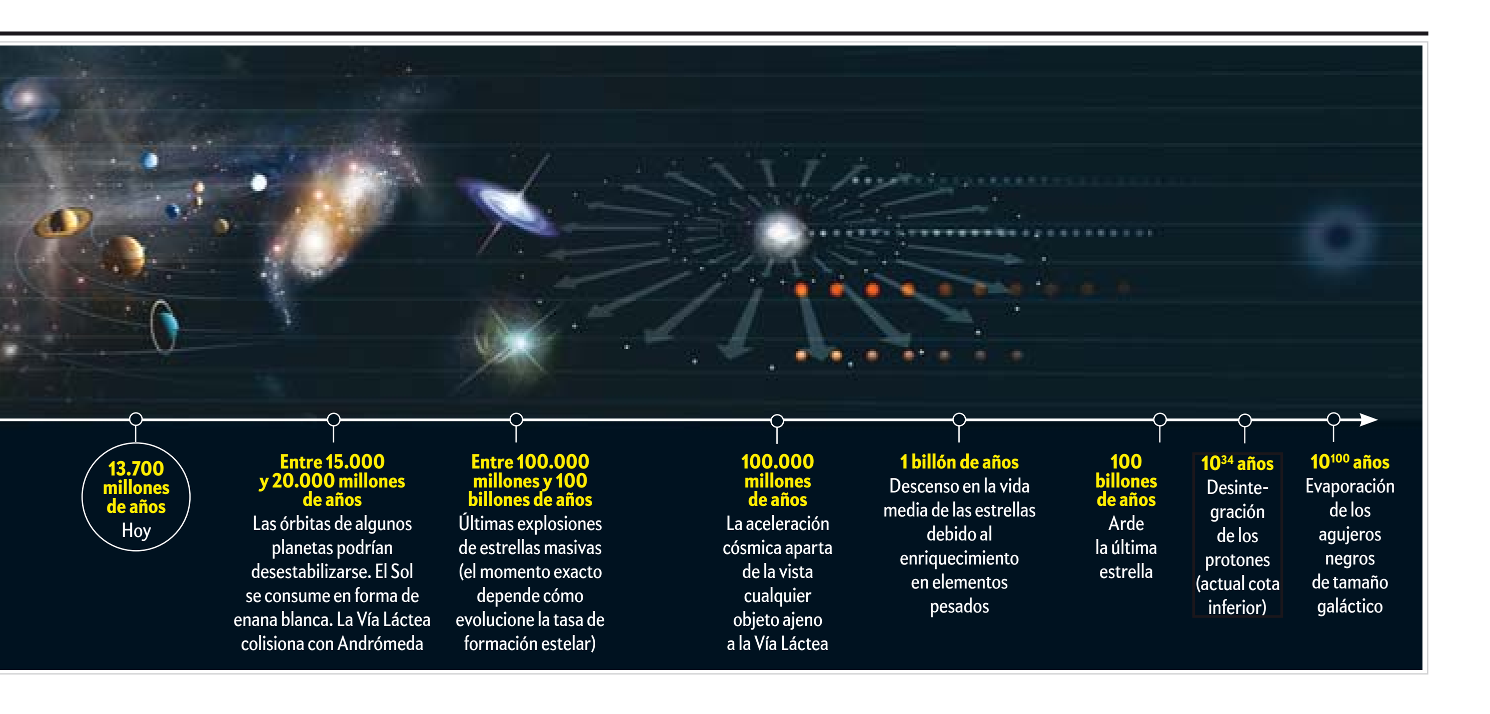
Entre los pioneros de este campo se encuentra Greg Laughlin, experto en formación estelar de la Universidad de California en Santa Cruz. Como parte de su tesis doctoral, desarrolló un programa informático para calcular la evolución de las estrellas de masa muy baja. Sin embargo, olvidó incluir un comando que ordenase al programa detenerse cuando alcanzase la edad actual del universo. Abandonado a su suerte, el código calculó todo tipo de predicciones para los próximos billones de años. Aunque resultaron ser incorrectas, bastaron para despertar en Laughlin su interés por el futuro del cosmos.

Para inferir el futuro de las estrellas, primero debemos entender sus procesos de formación. Las estrellas nacen en el seno de gigantescas nubes de gas y polvo cuyas masas pueden ascender a entre cientos de miles y varios millones de veces la del Sol. Esparcidos por la Vía Láctea, estos viveros estelares dieron lugar a los cientos de miles de millones de estrellas que hoy la pueblan. Todavía producirán unas cuantas decenas de miles de millones más, pero esa materia prima acabará consumiéndose. A pesar de que las estrellas de mayor masa terminan sus días en forma de violentas explosiones de supernova, las cuales devuelven parte de su material al medio interestelar, y aunque las galaxias absorben gas del medio intergaláctico, esos procesos no bastan para reponer todo el gas y polvo. En la actualidad, el gas del medio interestelar de la Vía Láctea apenas asciende a una décima parte de la masa que suman sus estrellas.

En estos momentos, nuestra galaxia produce nuevas estrellas a un ritmo de una masa solar al año. Sin embargo, hace unos 8000 o 10.000 millones de años, esa tasa era al menos unas 10 veces mayor. Laughlin calcula que el ritmo de formación estelar disminuirá en un factor 10 cada vez que el universo multiplique su edad por ese mismo número. Así, dentro de 100.000 millones de años, la tasa se habrá reducido a una décima parte de su valor actual. En un billón de años, la galaxia apenas generará una centésima de masa solar al año en forma de nuevas estrellas.

No obstante, algunos acontecimientos podrían dar al traste con esa marcha hacia las tinieblas. Hoy sabemos que, dentro de algunos miles de millones de años, la Vía Láctea colisionará con Andrómeda, la galaxia espiral gigante más cercana. Las densas regiones centrales de ambos objetos acabarán chocando u orbitando en torno a su centro de masas común, lo que en cualquier caso dará lugar a una nueva estructura que podríamos llamar «Vía Landrómeda». Su nacimiento irá acompañado de un incremento transitorio de la tasa de formación estelar, lo que en la jerga astronómica se conoce como «brote». Pero, una vez superado, el sistema adoptará el aspecto de una galaxia elíptica, un objeto maduro con una baja densidad de gas frío y, por tanto, con un ritmo lento de génesis de nuevas estrellas.

Además de formarse en menor número, las estrellas del futuro también reflejarán los cambios que experimentará la materia prima a partir de la cual habrán de formarse. Los únicos elementos químicos que se forjaron tras la gran explosión fueron el hidrógeno, el helio y el litio; todos los demás se sintetizaron después, en el interior de las estrellas. En las gigantes rojas, que con el tiempo se desprenden de sus capas más externas, se producen la mayoría de los elementos más ligeros y abundantes, como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno. Las supernovas, por su parte, generan una variedad de elementos mucho más rica, la cual abarca hasta el uranio. Todos ellos se mezclan después en el crisol del medio interestelar, lo que implica que las nuevas generaciones de estrellas comienzan su vida con una proporción mayor de dichos elementos. El Sol, una estrella relativamente joven a sus 5000 millones de años, posee una cantidad de elementos pesados cien veces mayor que las estrellas que se formaron hace 10.000 millones de años.



De hecho, algunas de las estrellas más viejas que se conocen hoy en día apenas contienen estos elementos. Las generaciones venideras, en cambio, presentarán una proporción aún mayor, lo que afectará tanto a su funcionamiento como a su apariencia.

NUEVAS FUENTES DE VIDA

Una mayor abundancia de elementos pesados acarrea dos consecuencias importantes. En primer lugar, aumenta la opacidad de las capas externas de la estrella. Mientras que el hidrógeno y el helio son casi transparentes, una pequeña cantidad de elementos pesados puede llegar a absorber gran parte de la radiación. El equilibrio de fuerzas en el interior del astro también se altera, pues una menor luminosidad implica un consumo más lento del combustible nuclear. Por tanto, podríamos concluir que una estrella rica en elementos pesados viviría más tiempo que una de la misma masa pero carente de ellos. Sin embargo, existe un efecto adicional que contrarresta el anterior: los elementos pesados resultan inertes a los procesos nucleares. Al no participar en las reacciones de fusión, reducen la cantidad de combustible del que dispone la estrella, por lo que tienden a acortar su vida.

En 1997, Laughlin y Fred Adams, de la Universidad de Michigan, realizaron el primer estudio sobre la importancia relativa de ambos efectos. Hallaron que el primero de ellos, el responsable de una existencia más longeva como consecuencia de una opacidad mayor, predominará durante el próximo billón de años. Pero, pasado ese tiempo, la fracción de elementos pesados habrá aumentado lo suficiente como para comenzar a acortar la vida de las estrellas. El cambio de régimen se producirá cuando la fracción de elementos pesados en las nuevas estrellas ascienda al cuádruple del valor actual.

Sin embargo, la abundancia de elementos muy pesados favorecerá la formación de planetas, lo que facilitará la aparición de vida. Se ha medido la composición química de las estrellas que acogen a los más de 700 planetas similares a Júpiter descubiertos hasta la fecha. Los resultados indican que un astro con una proporción elevada de elementos pesados cuenta con más posibilidades de albergar planetas gigantes. Según John Johnson, planetólogo del Instituto de Tecnología de California, el número de planetas de tipo joviano guarda una clara correlación con la abundancia de elementos pesados, por lo que cabe esperar una mayor formación de planetas a medida que el medio interestelar se enriquezca con dichos elementos.

¿Qué ocurrirá con los planetas similares a la Tierra? Aunque los telescopios espaciales apenas han empezado a proporcionar datos sobre mundos de menor tamaño, parece que su nacimiento también se halla relacionado con la abundancia de elementos pesados en sus estrellas anfitrionas. Parece, por tanto, que podemos aventurar un universo futuro cuajado de planetas. A pesar de la disminución de las tasas de formación estelar, puede que entre la mitad y dos tercios de los planetas del cosmos estén aún por formarse.

En principio, esa proliferación de planetas no tendría por qué resultar especialmente prometedora para la vida, pues la mayoría de las estrellas futuras serán menos masivas y menos luminosas que el Sol. Sin embargo, también los astros tenues y de poca masa pueden ser fuente de vida. Una estrella mil veces menos luminosa que el Sol basta para mantener temperaturas que permitan la existencia de líquidos en los planetas cercanos, lo que parece un requisito básico para la existencia de organismos vivos.

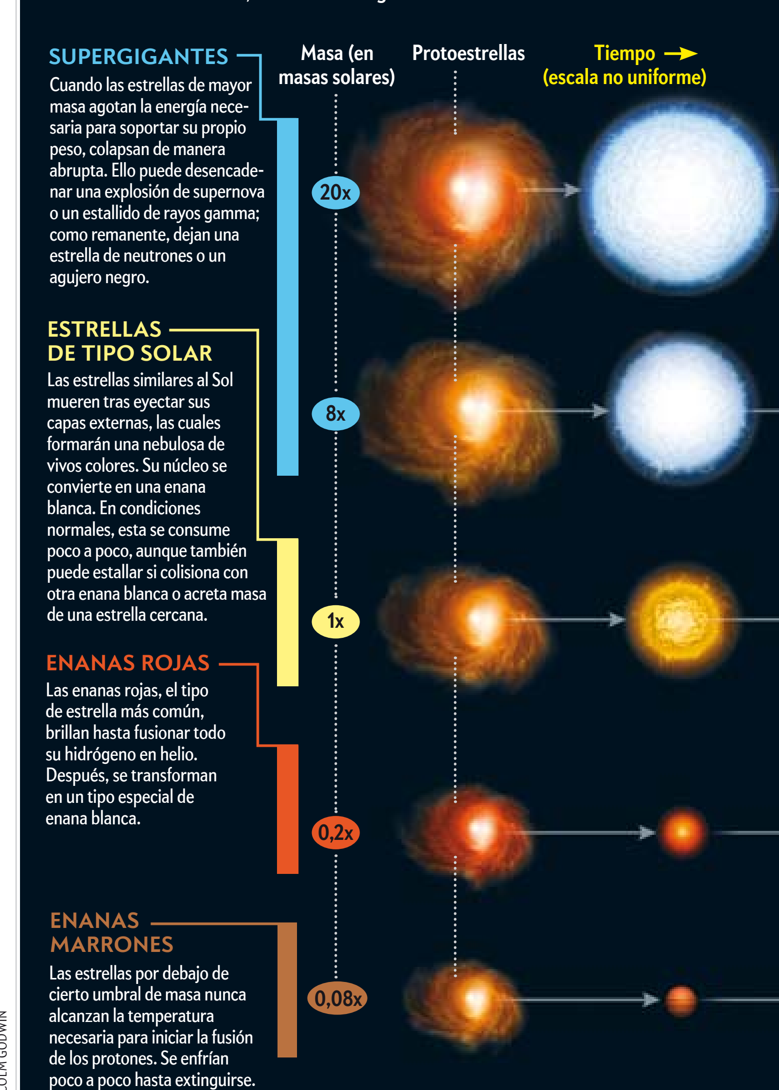
EL FUTURO DE LA EVOLUCIÓN ESTELAR

Los mansos heredarán el cosmos

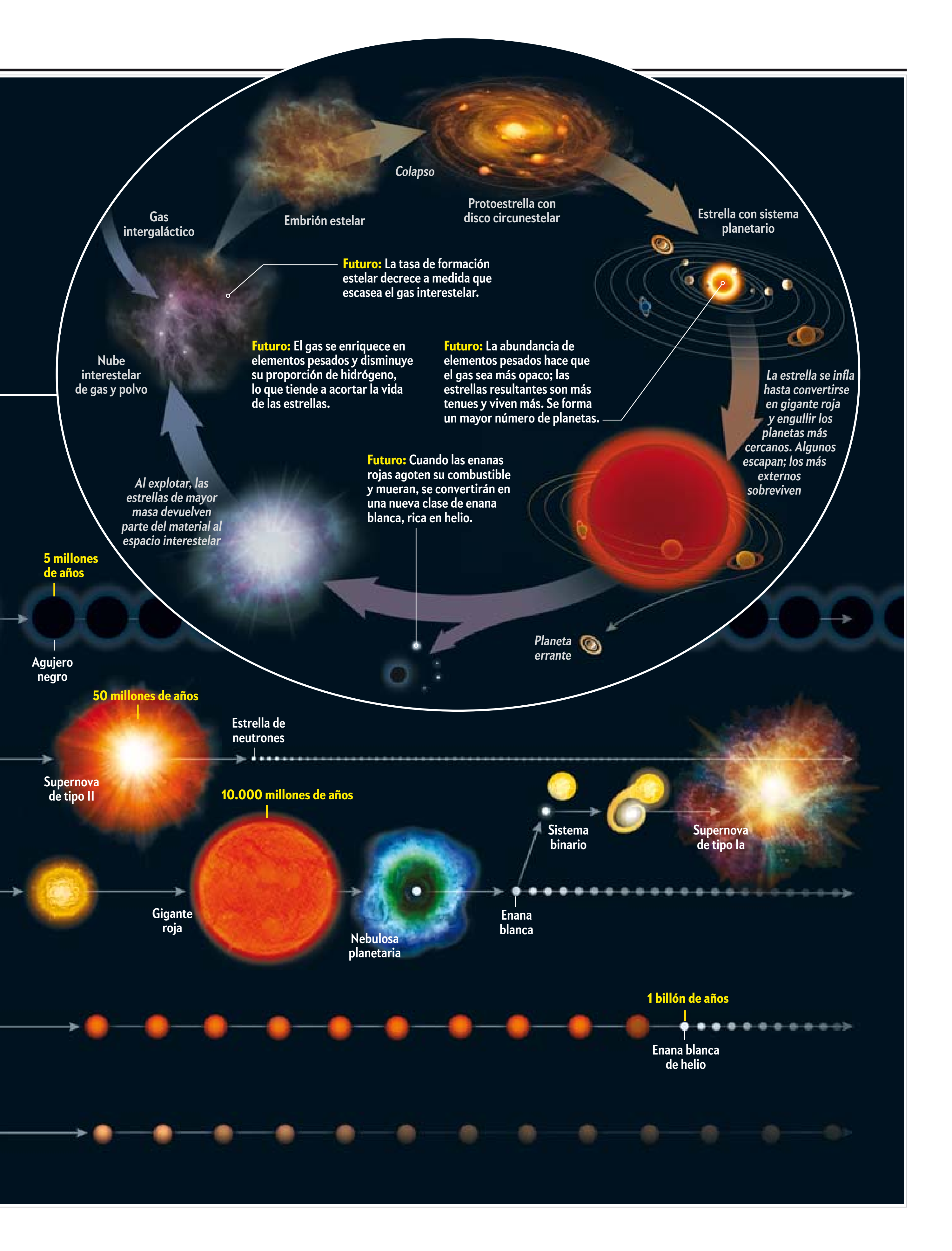
En lo que se refiere a su brillo absoluto, los días de gloria del universo han quedado atrás. En otros aspectos, sin embargo, su actividad se prolongará durante billones de años. Las enanas rojas (con mucho, el tipo de estrella más abundante) apenas han comenzado su ciclo vital; con el tiempo, darán lugar a nuevos tipos de estrellas. Las nuevas generaciones estelares incorporarán los elementos pesados forjados por sus predecesoras, lo que modificará su aspecto y su esperanza de vida. Los planetas abundarán más que en la actualidad y numerosos procesos hoy exóticos se sucederán de manera cotidiana.

Los vencedores de la carrera cósmica

El ciclo de vida de las estrellas sigue una regla muy simple: cuanto mayor es el astro, antes y con mayor violencia sucumbe. Las estrellas masivas poseen más combustible, pero lo consumen a un ritmo muy elevado debido a su gran luminosidad. En términos astronómicos, no viven sino durante un abrir y cerrar de ojos. El futuro pertenece a las estrellas de menor masa, mucho más longevas.



MALCOLM GODWIN


Colapso
Gas intergaláctico
Embrión estelar
Protoestrella con disco circunestelar
Estrella con sistema planetario
Futuro: La tasa de formación estelar decrece a medida que escasea el gas interestelar.
Nube interestelar de gas y polvo
Futuro: El gas se enriquece en elementos pesados y disminuye su proporción de hidrógeno, lo que tiende a acortar la vida de las estrellas.
Futuro: La abundancia de elementos pesados hace que el gas sea más opaco; las estrellas resultantes son más tenues y viven más. Se forma un mayor número de planetas.
La estrella se infla hasta convertirse en gigante roja y engullir los planetas más cercanos. Algunos escapan; los más externos sobreviven
Futuro: Cuando las enanas rojas agoten su combustible y mueran, se convertirán en una nueva clase de enana blanca, rica en helio.
Al explotar, las estrellas de mayor masa devuelven parte del material al espacio interestelar
5 millones de años
Agujero negro
Planeta errante
50 millones de años
Estrella de neutrones
Supernova de tipo II
10.000 millones de años
Sistema binario
Supernova de tipo Ia
Gigante roja
Nebulosa planetaria
Enana blanca
1 billón de años
Enana blanca de helio

Los planetas no solo abundarán más, sino que también contendrán una mayor proporción de los elementos que se consideran necesarios para la vida. Además de la abundancia de líquido, la vida en la Tierra depende de la presencia de carbono, nitrógeno y oxígeno. Con el tiempo, la creciente abundancia de estos elementos debería redundar en planetas más hospitalarios. A pesar de que disminuirá la tasa de formación estelar, cada nueva estrella contará con una probabilidad cada vez mayor de iluminar uno o más planetas potencialmente habitables. Algunos astros poseerán masas y luminosidades muy bajas, lo que alargará su vida durante cientos de miles de millones de años (si bien nada indica que se necesiten semejantes lapsos de tiempo para que la vida brote y evolucione). Con independencia de cuán poblado se halle el universo actual, el futuro se antoja rebosante de las más variadas formas de vida.

LA GUERRA DE LOS MUNDOS

Los sistemas planetarios perdurarán el tiempo suficiente como para que haya que tener en cuenta otros factores. Solemos dar por sentada la estabilidad del sistema solar: a nadie le preocupa que la órbita de la Tierra se vuelva caótica y nos lance contra Venus. Pero esta confianza se disipa cuando uno considera escalas temporales del orden de miles de millones de años. En 2009, Jacques Laskar y Mickael Gastineau, del Observatorio de París, realizaron miles de simulaciones numéricas de las órbitas futuras de los cuatro planetas interiores, en cada una de las cuales variaron unos pocos metros las posiciones iniciales. Hallaron una probabilidad del 1 por ciento de que Venus acabe chocando contra Mercurio durante los próximos 5000 millones de años. Algo así daría pie a cataclismos aún mayores, algunos de los cuales podrían llevarse la Tierra por delante. Pasados un billón de años, la probabilidad de que se produzca una colisión tal resulta muy elevada.

Pero la gran agitación llegará cuando Andrómeda y la Vía Láctea se fusionen. Semejante acontecimiento afectará a la configuración del campo gravitatorio de ambas galaxias, lo que bien podría reestructurar por completo el sistema solar. A propósito de las simulaciones de Laskar y Gastineau, Laughlin comentó: «Lo que aún hemos de entender es hasta qué punto la mano invisible del caos dinámico que de manera tan sutil afecta al sistema solar ha moldeado el censo planetario de la galaxia».

El caos orbital que puede perturbar a un sistema planetario se manifiesta también a escalas mayores. Como consecuencia de su atracción mutua, algunas estrellas forman sistemas dobles, triples o múltiples, en cuyo caso cada una de ellas orbita en torno al centro de masas común. Lo mismo ocurre en los cúmulos estelares o incluso en galaxias enteras. Las estrellas que componen tales estructuras casi nunca entran en contacto; a pesar de su proximidad en términos astronómicos, se hallan separadas por inmensos espacios vacíos. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, ese «casi nunca» se convierte en «a veces» y, por último, en «casi siempre». Tarde o temprano, todos los sistemas estelares binarios acabarán por disgregarse, debido a la acción de fuerzas gravitatorias externas, o bien por fusionarse, si las estrellas orbitan lo suficientemente cerca.

Cuando dos estrellas se fusionan, pueden engendrar de manera temporal una estrella de mayor masa y luminosidad [*véase* «Colisiones estelares», por Michael Shara; Investigación y Ciencia, enero de 2003]. Incluso un planeta como Júpiter podría causar un efecto similar, aunque a menor escala. Consideremos una estrella modesta, con una masa diez veces menor que la del Sol y una vida media próxima al billón de años, y supongamos que en torno a ella orbita un planeta similar a Júpiter. Si su período orbital supera unos pocos días, lo más probable es que acabe sus días expulsado del sistema. Pero, en caso de seguir una órbita más próxima, podría terminar colisionando con su estrella anfitriona. Ello proporcionaría una nueva fuente de hidrógeno al astro, que, durante un tiempo, dispararía su emisión de energía y provocaría una explosión similar a una nova. En el futuro, tales erupciones estelares salpicarán el lento declive de las estrellas. Los astrónomos que habiten el universo dentro de un billón de años aún podrán observar acontecimientos exóticos en el siempre menguante número de estrellas de sus galaxias.

VIVIR DESPACIO PARA MORIR VIEJO

Dentro de decenas o centenares de miles de millones de años, después de que los procesos de formación estelar se hayan ralentizado hasta casi desaparecer, un ingente número de estrellas continuará brillando. La mayoría de las estrellas del universo presentan una masa baja y una esperanza de vida muy larga. El tiempo durante el cual brilla una estrella aumenta sobremanera a medida que disminuye su masa. Las estrellas masivas se extinguen con gran rapidez: son tan luminosas que queman todo su combustible muy pronto y acaban explotando al cabo de unos pocos millones de años. Los astros de masa intermedia, como el Sol, viven durante varios miles de millones de años. Pero las estrellas mucho menores consumen su combustible con tal lentitud que sus exiguos recursos bastan para alimentarlas durante miles de millones de años, si no más.

También la forma en que sucumbe el astro depende de su masa. El Sol se convertirá en una gigante roja y, a medida que sus capas exteriores se dispersen por el espacio interestelar, su núcleo irá quedando al descubierto hasta quedar reducido a una enana blanca, un denso cadáver estelar del tamaño de la Tierra y compuesto casi exclusivamente por núcleos de carbono y electrones. En cambio, en las estrellas de masa inferior a la mitad de la del Sol, el núcleo nunca alcanza la temperatura necesaria para desencadenar las reacciones nucleares que conducen a la fase de gigante roja. Se cree que estos astros acaban sus vidas convertidos en enanas blancas de helio; estas, como su nombre indica, se componen en su mayor parte de helio, con apenas algo de hidrógeno y trazas de otros elementos. En el universo actual, tales astros se forman de manera esporádica, cuando las componentes de un sistema binario se arrancan mutuamente sus capas externas antes de que se inicie la ignición de sus núcleos de helio. Sin embargo, aún no se ha descubierto ninguna cuyo origen se deba a un proceso normal de evolución estelar. La razón es simple: el cosmos no ha vivido aún lo suficiente. Las enanas de helio aisladas constituyen uno de los principales ejemplos de la clase de nuevos fenómenos que, en un futuro lejano, nuestros descendientes llegarán a ver algún día.

Las estrellas dotadas de gran masa sufren una muerte mucho más trágica. Algunas de ellas se convierten en agujeros negros o estrellas de neutrones; en tales casos, el colapso del núcleo provoca una onda de choque que barre las capas externas del astro y las expulsa en una explosión de supernova. A medida que estos astros de gran tamaño dejen de poblar el cielo, así ocurrirá también con dichos estallidos, que hoy en día salpican el cosmos. Otro tipo de supernova, sin embargo, aún iluminará el cielo: las supernovas de tipo Ia, las cuales se generan a partir de sistemas binarios en los que una de sus componentes es una enana blanca. De acuerdo con los modelos más aceptados, parte del material rico en hidrógeno de su compa-

EL FUTURO DE LA COMPOSICIÓN ESTELAR

Abonar el cosmos

Las estrellas obtienen su energía al fusionar hidrógeno en helio y, después, el helio en otros elementos más pesados. Cada generación estelar posee una proporción de elementos pesados mayor que la anterior. Este proceso modifica el aspecto y la longevidad de las estrellas, al tiempo que contribuye a formar más planetas.

Unos minutos tras la gran explosión
Hoy
Dentro de un billón de años

Hidrógeno
Helio
Elementos más pesados que el helio

JEN CHRISTIANSEN

ñera se va depositando sobre la superficie de la enana blanca hasta que su repentina fusión nuclear detona la supernova. Estos sucesos podrían continuar ocurriendo mientras queden compañeras lo suficientemente masivas, una situación que podría prolongarse durante 100.000 millones de años.

Otra clase de supernova, cuya popularidad ha aumentado durante los últimos años, sobreviene en sistemas binarios formados por dos enanas blancas muy próximas. Al orbitar en torno al centro de masas común, emiten radiación gravitatoria, lo que drena la energía del sistema y provoca un acercamiento progresivo de los astros; una espiral que culmina en una violenta explosión. Este tipo de eventos podrá seguir teniendo lugar durante billones de años.

Otra clase de cataclismos cósmicos, los estallidos de rayos gamma, emiten aún más energía que las explosiones de supernova. Estas explosiones se clasifican en dos tipos, los cuales parecen obedecer a procesos muy dispares. Se sospecha que los estallidos «largos», aquellos que se prolongan durante más de dos segundos, se producen cuando el núcleo de una estrella de gran masa colapsa para formar una estrella de neutrones. Los estallidos cortos, inferiores a dos segundos, probablemente aparezcan como consecuencia de la fusión entre dos estrellas de neutrones, o entre uno de tales objetos y un agujero negro. En un futuro muy lejano, los estallidos largos ocurrirán cada vez con menor frecuencia, pues cada vez habrá menos estrellas masivas. Los estallidos cortos, por su parte, continuarán iluminando los cielos durante billones de años.

BILLONES DE AÑOS DESPUÉS

Cuando la edad del universo ascienda a varios billones de años, los procesos de formación estelar habrán concluido. Casi todas las estrellas, a excepción de aquellas de menor masa, habrán acabado sus vidas, ya sea explotando o consumiéndose poco a poco como enanas blancas. Sin contar con la materia oscura, cuya composición continúa siendo un misterio, las galaxias se compondrán sobre todo de agujeros negros, estrellas de neutrones, enanas blancas y estrellas rojas muy débiles, tan tenues que, desde un planeta como la Tierra, ninguna de ellas sería visible sin la ayuda de un telescopio, tampoco aquellas que se encontrasen a una distancia inferior a la que hoy media entre el Sol y las estrellas más cercanas.

Aun así, de entre todos esos objetos muertos o moribundos, la naturaleza producirá de manera ocasional una tremenda explosión, un breve recordatorio de la furia nuclear que en su momento hizo resplandecer el cielo con la luz de miles de millones de fraguas estelares. Si en torno a los astros supervivientes orbitasen planetas —y cabe esperar que, en multitud de casos, probablemente en la mayoría, así será—, el agua líquida y diversas formas de vida podrían aparecer y subsistir en ellos. Y esa vida contaría con la posibilidad (ya existente en las estrellas más tenues) de perdurar un tiempo mucho mayor del que nos es dado imaginar con facilidad... siempre y cuando no sea barrida por la explosión de una supernova o un estallido de rayos gamma cercano.

El lejano futuro cósmico que acabamos de esbozar deja sin responder una cuestión importante: ¿podría una civilización avanzada, en caso de haber sobrevivido hasta entonces, cambiar el curso de la historia cósmica? Hace más de treinta años, Freeman Dyson, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, presentó uno de los primeros análisis relativos a semejante especulación. «Creo haber demostrado que hay razones científicas para tomar en serio la posibilidad de que la vida y la inteligencia puedan llegar a moldear el universo para sus propios fines», concluyó. En la época actual, apenas 14.000 millones de años después de la gran explosión, no existen pruebas de que los organismos vivos hayan afectado el devenir del cosmos a gran escala. Pero, en este viaje por el tiempo, nuestro tren apenas acaba de partir de la estación. En el futuro, la supervivencia de cualquier forma de vida dependerá de la explotación de una fracción cada vez mayor de los recursos del universo [*véase* «El sino de la vida en el universo», por L. M. Krauss y G. D. Starkman; Investigación y Ciencia, febrero de 2000]. Todo el cosmos se convertirá en nuestro jardín.

Pasajeros por apenas un instante en semejante travesía, jamás podremos vaticinar con certeza qué nos deparará el futuro. Pero nuestras mentes son libres de deambular por él tanto como deseen. Como escribió Wystan H. Auden en 1957: «Si desapareciesen o muriesen todas las estrellas / habría de aprender a contemplar un cielo vacío / y sentir su oscuridad total como sublime / aunque pudiera llevarme un tiempo».

PARA SABER MÁS

The five ages of the universe: Inside the physics of eternity. Fred Adams y Greg Laughlin. Free Press, 2000.

The runaway universe: The race to find the future of the cosmos. Donald Goldsmith. Basic Books, 2000.

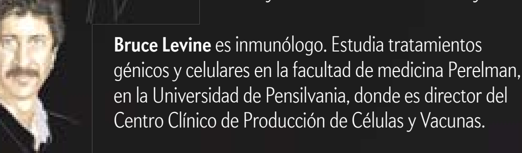
The formation and evolution of the Milky Way. Cristina Chiappini en *American Scientist*, vol. 89, n.º 6, págs. 506-515, noviembre/diciembre de 2001.

An integrated picture of star formation, metallicity evolution, and galactic stellar mass assembly. L. L. Cowie y A. J. Barger en *Astrophysical Journal*, vol. 686, n.º 1, págs. 72-116, 10 de octubre de 2008. **arxiv.org/abs/0806.3457**.





Carl June es médico e investigador en la facultad de medicina Perelman, en la Universidad de Pensilvania. Estudia el modo de modificar genéticamente el sistema inmunitario para luchar con mayor eficacia contra el cáncer y el VIH.



Bruce Levine es inmunólogo. Estudia tratamientos génicos y celulares en la facultad de medicina Perelman, en la Universidad de Pensilvania, donde es director del Centro Clínico de Producción de Células y Vacunas.

MEDICINA

Cerrar el paso al VIH

Un paciente se ha librado del VIH gracias a un tratamiento que impidió la entrada del virus en ciertas células inmunitarias. Pero la técnica resulta peligrosa y difícil de repetir. ¿Se descubrirá una forma más segura y viable que ayude a millones de pacientes?

Carl June y Bruce Levine

Hace poco más de tres años, un equipo médico de Berlín publicó los resultados de un experimento único que asombró a los que investigaban el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). El grupo alemán había obtenido médula ósea (donde se forman las células inmunitarias) de un donante anónimo cuya herencia genética le hacía resistente al virus. A continuación, los investigadores trasplantaron las células a un hombre con leucemia que había sido seropositivo durante más de diez años. Aunque el trasplante de médula ósea se realizó para tratar la leucemia, se esperaba que la intervención proporcionara al paciente suficientes células resistentes al virus para combatir la infección. El tratamiento superó las expectativas. Además de disminuir la cantidad de VIH en la sangre, el trasplante eliminó del organismo todo rastro detectable del patógeno, en particular de los múltiples tejidos donde podría haber permanecido latente. El equipo mostró tal sorpresa por los espectaculares resultados que esperaron casi dos años antes de publicarlos.

La noticia parecía demasiado buena para ser cierta. Y sin embargo, cinco años después del tratamiento, el paciente de Berlín (quien más tarde reveló su identidad como Timothy Ray Brown, de California) sigue sin presentar signos de albergar el virus del sida, a pesar de no haber tomado antirretrovíricos durante todo este tiempo. De los más de 60 millones de personas que se han infectado con el VIH en los últimos decenios, Brown es, hasta la fecha, la única persona en la que se ha confirmado la erradicación de la infección.

Por desgracia, el método no puede aplicarse de forma generalizada por numerosas razones. Un aspecto importante es que, en un primer paso, debe destruirse el sistema inmunitario del enfermo, lo que representa una intervención muy arriesgada. Pero el éxito inesperado ha empujado a los investigadores de todo el mundo a intentar hallar formas más seguras y menos costosas de dar a los pacientes un sistema inmunitario nuevo y





Rompecabezas desencajado: El VIH (*representado por las piezas rojas*) se une normalmente a las proyecciones proteicas de las células del sistema inmunitario (*piezas blancas*). Mediante la eliminación de las proyecciones, se espera que las células inmunitarias se vuelvan resistentes al VIH.

resistente al VIH, como el que recibió Brown. Tal hazaña permitiría cerrarle el paso al VIH, que dejaría así de propagarse de célula en célula. Con el tiempo, el sistema inmunitario modificado terminaría por eliminar el VIH restante en cualquier zona del cuerpo. En lugar de los sucesivos tratamientos tradicionales, que solo ponen freno al virus, el nuevo método podría eliminar el patógeno y además curar la enfermedad.

De hecho, pensamos que habría un modo más fácil de proporcionar a los infectados con el VIH un sistema inmunitario que imitase al adquirido por el paciente de Berlín. El procedimiento se ha mostrado prometedor en el laboratorio y ahora estamos llevando a cabo los primeros ensayos clínicos en un reducido número de personas infectadas. Tenemos mucho trabajo por delante y todavía no se puede asegurar que el tratamiento resulte eficaz, pero nuestros resultados preliminares y el hecho de que el paciente de Berlín siga sin presentar VIH nos hacen pensar que la estrategia que estamos desarrollando podría cambiar la vida a millones de personas infectadas con el VIH.

REAJUSTE DEL SISTEMA INMUNITARIO

Nuestra estrategia para crear un sistema inmunitario que haga frente al VIH se basa en una investigación que ha abordado dos cuestiones relacionadas. Una de ellas ha consistido en averiguar la forma de impulsar el sistema inmunitario contra el virus. La otra, evitar que el VIH se introdujera en sus células favoritas, las CD4+, también conocidas como linfocitos T coadyuvantes; representan los elementos defensivos que coordinan la interacción entre diversos tipos de células inmunitarias. Cuando al principio el VIH infecta a un linfocito T, el virus no ocasiona ningún daño. Pero más tarde, cuando esa célula se activa para contrarrestar una infección en curso, en lugar de hacerlo, expulsa más copias del VIH. Y lo que es más lamentable, al final el VIH destruye también a estas células de coordinación, lo que agota la capacidad del sistema inmunitario para luchar contra otras infecciones. De este modo, el VIH elimina de forma selectiva los elementos más efectivos de defensa. Al disminuir estos, también lo hace la capacidad del organismo para hacer frente a las infecciones, hasta que se establece el sida (el estado final marcado por infecciones mortales).

Averiguar el modo de reforzar el sistema inmunitario y, más aún, de proteger a los linfocitos T, no ha resultado nada fácil. Sin embargo, cuando apareció la noticia del paciente de Berlín ya se habían hecho progresos en ambos frentes, aunque en líneas de investigación diferentes.

Durante años, los oncólogos y los virólogos han buscando formas de estimular el sistema inmunitario. Una de ellas consiste en extraer linfocitos T de un paciente, exponerlos a ciertas sustancias para que se multipliquen y se vuelvan más activos (ya sea contra el cáncer o las infecciones víricas) y, por último, devolver las células potenciadas al paciente. Juntos nos dedicamos a ese empeño desde hace 20 años, en el Centro Médico Militar Nacional Walter Reed en Bethesda, Maryland. Basándonos en el trabajo de otros, iniciamos los experimentos para mejorar los métodos de cultivo de linfocitos T fuera del cuerpo. En ese momento, en el laboratorio solo se hacía crecer los linfocitos T de un donante bien mediante el empleo de cócteles complejos de mensajeros químicos, bien mediante la extracción de células dendríticas del donante, otro tipo de célula sanguínea que ordena a los linfocitos T que maduren y se multipliquen en grandes cantidades.

Pensamos que si creábamos células dendríticas artificiales podríamos simplificar el proceso. Partiendo de pequeñas bolas magnéticas un poco más pequeñas que los linfocitos T, unimos a su superficie dos proteínas que imitaban las moléculas de la superficie de las células dendríticas. Al mezclarlas con los linfocitos T en frascos de laboratorio, las bolas realizaron con eficacia la tarea que se les había asignado. Mediante la reposición de las bolas cada dos semanas, logramos mantener una colonia de linfocitos T activos que se multiplicaron durante más de dos meses e incrementaron su número en más de un billón de veces.

Cuando ensayamos ese método con muestras sanguíneas de voluntarios seropositivos descubrimos, para nuestra sorpresa, que los linfocitos T que habíamos producido presentaban una capacidad notable (aunque temporal) para detener el avance del VIH. Publicamos nuestros resultados en junio de 1996, cuando aún desconocíamos por qué nuestro método de las bolas magnéticas para cultivar linfocitos T aumentaba su resistencia a la infección por el VIH. Pero más tarde, aquel mismo año, surgió una idea importante que en última instancia ayudaría a desentrañar el misterio.

UNA ENTRADA A LA INFECCIÓN

Mientras desarrollábamos la técnica para hacer crecer linfocitos T, otros investigadores descubrieron un defecto fundamental en la estrategia de ataque del VIH. Al inicio de la epidemia del sida se habían identificado unos pocos individuos que parecían presentar resistencia a la infección a pesar de haber estado expuestos al virus en múltiples ocasiones. Hacia finales de 1996, en un frenesí de publicaciones científicas, varios laboratorios informaron que la proteína CCR5, situada en la superficie de los linfocitos T coadyuvantes y de otras células, actuaba como una puerta que permitía la entrada del VIH. Además, se observó que las personas que de forma natural carecían de la proteína no se infectaban [*véase* «Genes que oponen resistencia al sida», por Stephen J. O'Brien y Michael Dean; Investigación y Ciencia, diciembre de 1997].

La ausencia de la molécula se debe a la deleción de 32 nucleótidos (las letras A, T, C y G del alfabeto del ADN) en el gen que la codifica. La mutación da lugar a una proteína CCR5 más corta, incapaz de alcanzar su lugar en la superficie de la célula. Cerca de un 1 por ciento de los caucásicos han heredado dos copias de ese gen defectuoso, llamado *CCR5-Delta32*, por lo que sus células presentan una elevada resistencia a la infección por el VIH. Sin embargo, la mutación resulta poco frecuente entre

EN SÍNTESIS

El VIH se sirve de cierta molécula que se aloja en la superficie de algunas células del sistema inmunitario, la proteína CCR5, para infectar a esas células.

Algunas personas han heredado una mutación que da lugar a una proteína CCR5 defectuosa, lo que les confiere una mayor protección contra la infección del VIH.

Se están ensayando técnicas de manipulación genética para que las células inmunitarias no sinteticen la proteína CCR5, de modo que se vuelvan también resistentes al VIH.

Los resultados preliminares de los estudios de seguridad en humanos sometidos a esa técnica son esperanzadores, pero todavía hay un largo camino por recorrer.

los nativos americanos, asiáticos y africanos. Aparte de su peculiaridad genética, los individuos afectados parecen sanos, aunque son más vulnerables al virus del Nilo Occidental.

Las personas que han heredado una sola copia del gen *CCR5-Delta32* también muestran sensibilidad al VIH, pero en ellas la enfermedad tarda más en progresar. Se ha demostrado que ciertos mensajeros químicos naturales, las beta-quimiocinas, bloquean los receptores CCR5 normales e impiden así el acceso al VIH. De hecho, el bloqueo de ese receptor representa la base de una serie de medicamentos contra el VIH. Por desgracia, resulta difícil mantener todos los receptores CCR5 de todas las células recubiertos con la cantidad suficiente de fármaco para evitar la entrada en ellas del VIH. Además, el VIH puede mutar y suprimir el bloqueo, y los virus ligeramente alterados siguen utilizando la proteína CCR5 para acceder al interior de los linfocitos T.

El descubrimiento del papel de CCR5 en la infección por el VIH ayudó a explicar por qué los linfocitos T que habíamos cultivado presentaban una mayor resistencia. De algún modo, su activación a partir de las bolas había provocado que dejasen de producir la proteína CCR5. Sin una entrada funcional, el VIH no pudo introducirse en los linfocitos.

En ese momento, nos preguntábamos si podíamos utilizar el hallazgo de la CCR5, junto con nuestro método recién perfeccionado de cultivo de linfocitos T, para crear un tratamiento nuevo frente al VIH. La idea nos llevó a una colaboración con Kristen Hege y Ando Dale, ambos entonces en Cell Genesys, una empresa de biotecnología en San Francisco, para dar un primer paso: realizar ensayos clínicos en humanos para determinar la seguridad de los linfocitos T modificados genéticamente para que buscaran y atacaran a las células infectadas por el VIH (linfocitos que se habían multiplicado con nuestra técnica de bolas magnéticas). Las células demostraron ser seguras a todos los efectos y sobrevivieron durante años después de la perfusión. Sin embargo, la modificación genética estudiada solo tuvo un efecto modesto en la replicación del VIH en los pacientes. Cell Genesys finalmente puso fin al proyecto.

CREAR UNA CÉLULA RESISTENTE AL VIH

En 2004, pocos años después de que ambos nos trasladásemos a la Universidad de Pensilvania, Ando vino a visitarnos y a proponernos un segundo experimento. La nueva empresa en la que trabajaba, Sangamo BioSciences, acababa de desarrollar una técnica para cortar las hebras de ADN de los genes en puntos seleccionados. El método era diferente y mucho más eficaz que otros porque permitía actuar sobre una secuencia específica de un gen. Hasta ese momento, no se disponía de una buena estrategia para controlar los genes o secciones de genes que se modificaban [*véase* «Edición de genes: una nueva herramienta para la biología molecular», por Moira A. McMahon et al.; Investigación y Ciencia, abril de 2012].

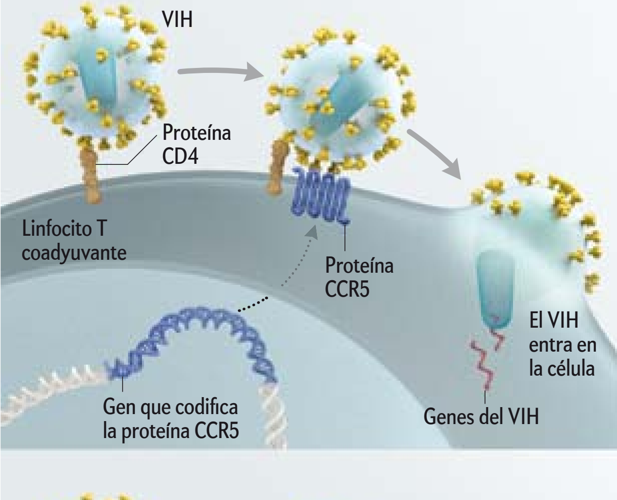
La técnica de Sangamo se basa en el empleo de dos tipos de proteínas que eliminan una sección de un gen funcional. El primer tipo son proteínas con dedos de zinc, moléculas que de forma natural se unen al ADN durante la transcripción génica (proceso en el que la información contenida en el ADN se convierte en ARN, la molécula necesaria para la síntesis proteica). Los humanos producimos unas 2500 proteínas distintas con dedos de zinc, cada una de las cuales se asocia a una secuencia de nucleótidos concreta en la molécula de ADN.

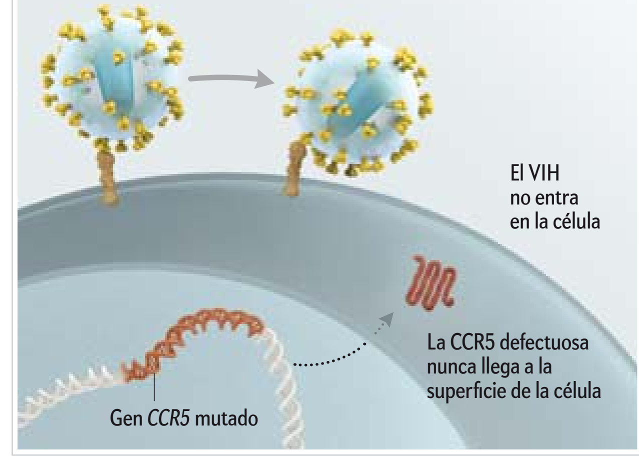
Durante años se elaboró un método para obtener de forma artificial proteínas con dedos de zinc que se unieran a una secuencia de ADN de interés, por ejemplo, una sección del gen

DENEGAR LA ENTRADA

Así se introduce el VIH en una célula inmunitaria

El VIH destruye el sistema inmunitario porque ataca a células esenciales, los linfocitos T coadyuvantes. En el decenio de los noventa del siglo XX se descubrió que el VIH lograba entrar en esas células al adherirse a una molécula de la superficie celular, la proteína CCR5 (*arriba*). Sin embargo, algunas personas presentan resistencia a la infección por el VIH porque carecen de un gen funcional que codifica esa proteína. Se espera que la desactivación del gen *CCR5* (*abajo*) en personas con VIH les permita luchar contra la infección e incluso eliminarla.





ANATOMY BLUE

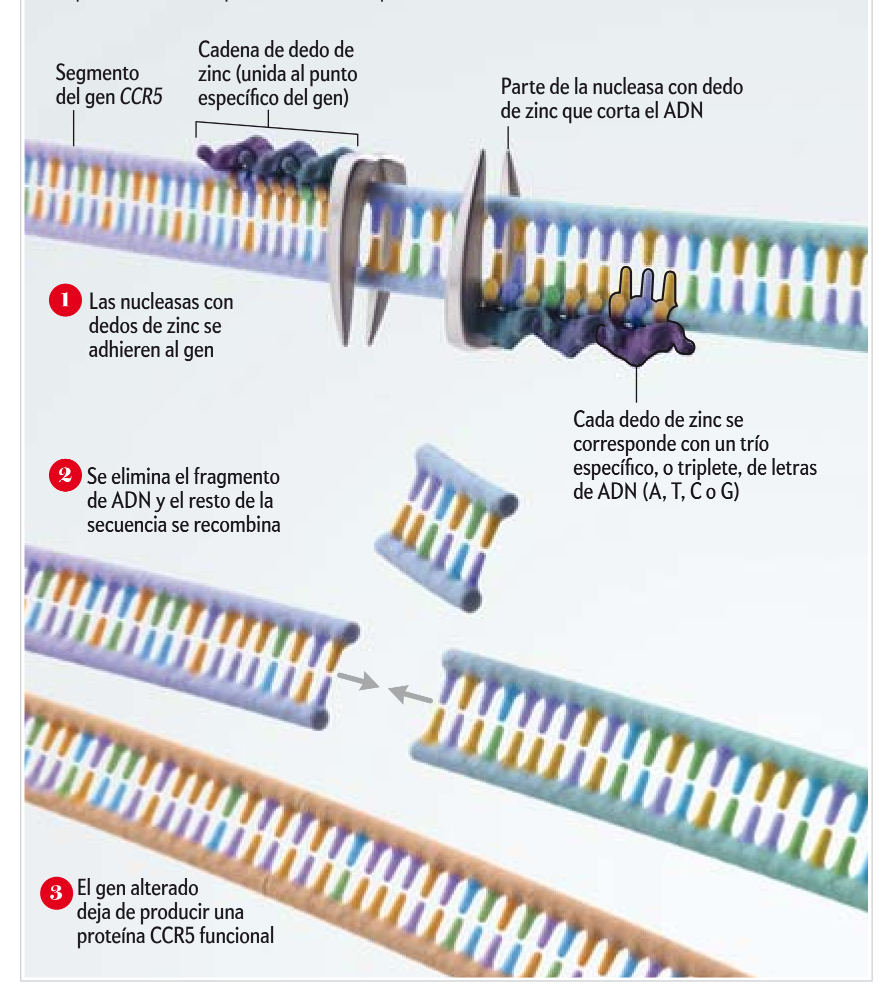
CCR5. Ando propuso a Sangamo que crease un conjunto de tijeras de ADN a la medida. En primer lugar se debían diseñar unas proteínas con dedos de zinc que se adhiriesen a cada uno de los extremos de la secuencia que se pretendía eliminar. Luego, a cada una de esas proteínas se le debía añadir otra, una enzima nucleasa, que cortara las hebras de ADN. La parte de dedos de zinc de ese complejo identificaría los fragmentos de ADN que debían suprimirse, y la nucleasa las cortaría. Mediante el desarrollo de los pares adecuados de dedos de zinc, Sangamo podría actuar únicamente sobre la sección de interés del gen CCR5, sin dañar por accidente a otros genes.

Una vez que las nucleasas con dedos de zinc se hubieran adherido a la secuencia de ADN en cuestión, la maquinaria celular de reparación tomaría el relevo. Reconocería la rotura y

CORTE Y EMPALME

Editar con precisión para desactivar un gen clave

La desactivación del gen que codifica la entrada CCR5 con la ayuda de ciertas proteínas compuestas, las nucleasas con dedos de zinc, conferiría a algunas personas resistencia al VIH. Una parte de la proteína, formada por moléculas denominadas dedo de zinc, se adhiere al gen, mientras que una segunda parte, la nucleasa, corta la hebra de ADN. A continuación, los mecanismos de reparación del organismo toman el relevo, que vuelven a unir las piezas más largas. Como resultado, el gen alterado ya no produce la proteína CCR5 que el VIH utiliza para introducirse en las células inmunitarias.



ANATOMY BLUE

volvería a unir las partes cortadas del ADN, y durante ese proceso destruiría algunos nucleótidos o añadiría otros. Así, el propio proceso de reparación aseguraría que el gen cortado no diera lugar a una copia funcional de la proteína CCR5.

A pesar de las dificultades que entrañaba la estrategia, valía la pena intentar la propuesta de Ando. Más allá de resultar muy específico para la deleción del gen *CCR5*, el sistema de dedos de zinc despertaba interés porque las proteínas necesitan poco tiempo para funcionar y no dejan residuos en la célula.

ESPERANZAS RENOVADAS

Ya habíamos recibido el permiso de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos y de los Institutos Nacionales de Salud (NIH) de EE.UU. para empezar los estudios de seguridad en humanos, cuando se difundió la noticia sobre el éxito aparente del tratamiento en el paciente de Berlín. Ello nos dio más motivos para pensar que la perfusión en los enfermos de los linfocitos T con genes *CCR5* mutados podría asestar un duro golpe al VIH. Gero Hütter y sus colaboradores informaron que habían llevado a cabo un experimento tal vez irrepetible. A uno de sus pacientes, que había sido seropositivo durante más de diez años y estaba reaccionando bien a los antivíricos, se le había diagnosticado una leucemia mieloide aguda no relacionada con la infección por el VIH. Se le sometió a quimioterapia, pero el cáncer volvió a aparecer. Sin un trasplante de médula ósea, método que en esencia recrea el sistema inmunitario (incluidos los linfocitos) de una persona en otra, el paciente moriría.

Hütter buscó posibles donantes de médula ósea en las bases de datos europeas; alguien cuyos marcadores HLA (los antígenos leucocitarios humanos, un grupo de proteínas que el sistema inmunitario utiliza para distinguir sus propios tejidos de los de otros) encajasen con los de su paciente. Hacer coincidir el tipo de HLA con el del receptor del trasplante resulta vital para impedir que el nuevo huésped identifique las células trasplantadas como extrañas y ataque sus tejidos (reacción conocida como enfermedad del injerto contra el huésped) y para evitar el rechazo de cualquier elemento residual del antiguo sistema inmunitario del paciente.

Sin embargo, Hüttler no se detuvo allí. Albergaba la esperanza de hallar algún candidato con los marcadores HLA correctos y cuyas células también presentasen de forma natural dos copias de la mutación *CCR5-Delta32*. Un trasplante de médula ósea procedente de esa persona tal vez proporcionaría a un receptor seropositivo un sistema inmunitario nuevo que ofreciese resistencia a los virus persistentes.

De modo sorprendente, después de buscar en las bases de datos y analizar los genes de más de 60 posibles donantes, Hütter encontró un candidato que cumplía los requisitos. La búsqueda fue complicada debido a que la región de los HLA varía mucho entre individuos y los genes de los HLA y el gen *CCR5* se sitúan en cromosomas diferentes. El descubrimiento fue un golpe de suerte si se tiene en cuenta, en primer lugar, que muy pocas personas presentan la mutación *CCR5-Delta32* en ambas copias de su gen *CCR5*. Afortunadamente, el paciente de Berlín también tenía un tipo de HLA muy común.

Al final, ese paciente necesitó dos trasplantes de médula ósea para curar su leucemia. Lo más llamativo ha sido que, más de cinco años después de la intervención, y en ausencia de tratamiento antirretrovírico, los médicos no han detectado ningún indicio de VIH en su sangre, hígado, intestino, cerebro, tejidos linfáticos o plasma, si bien se han utilizado los ensayos moleculares más sensibles de los que se dispone. Pero nadie sabe con seguridad si se

ha logrado erradicar el VIH de todos los tejidos, ya que el virus puede insertar sus genes en los cromosomas de varias células [*véase* «Farmacoterapias contra el VIH» por Mario Stevenson; Investigación y Ciencia, febrero de 2009] y permanecer en estado latente durante muchos años. También se desconoce si es necesaria la eliminación del virus en todos los tejidos, ya que ahora el sistema inmunitario del paciente tiene la capacidad de despachar cualquier infección nueva, lo que significa que está «funcionalmente curado». En cualquier caso, ya no tiene que tomar antirretrovíricos y no se le ha vuelto a detectar el virus.

Por desgracia, el experimento alemán tal vez constituya el único ejemplo de cura del VIH con médula ósea en los próximos años. No solo porque resulta muy infrecuente hallar la combinación adecuada de HLA y mutaciones genéticas en el donante y el receptor. Además, la técnica es muy cara (el trasplante de médula ósea acarrea un coste mínimo de 250.000 dólares en nuestro hospital) y conlleva un régimen intensivo de quimioterapia, un arriesgado trasplante y un tratamiento farmacológico de por vida contra el rechazo. En efecto, el paciente de Berlín ha sustituido un conjunto de problemas (infección por el VIH y leucemia) por otro (ser receptor de un trasplante). La mayoría de las personas que llevan vidas más o menos saludables y productivas gracias a los fármacos contra el VIH (aunque con efectos adversos notables y costos de por vida) dudarían en aceptar tal cambio. (Por supuesto, debido a que había desarrollado una leucemia mortal, el enfermo berlinés no tenía elección.)

A pesar de que los resultados de Berlín nos animaron, también sabíamos que la deleción del *CCR5* en el sistema inmunitario del donante podría no haber sido el único motivo de la eliminación aparente del VIH en el receptor. Tal vez el reservorio de partículas latentes del VIH en el paciente se había vaciado durante los años de tratamiento con antirretrovíricos. O tal vez el enfermo se quedó sin VIH residual después de que se destruyera su sistema inmunitario en la preparación para el trasplante. O quizás el único caso potencialmente mortal de enfermedad del injerto contra el huésped que el paciente de Berlín sufrió durante el trasplante destruyó también cualquier célula restante infectada por el VIH antes de que la reacción estuviese bajo control con la medicación. (La compatibilidad de los HLA nunca es perfecta al cien por cien, excepto entre gemelos idénticos.) Sin embargo, la deleción del *CCR5* sigue siendo la explicación más probable del éxito del trasplante, por lo que seguimos adelante esperanzados con nuestros experimentos.

ENSAYOS CLÍNICOS EN CURSO

Cuando apareció la noticia del paciente de Berlín, Sangamo había desarrollado, tal y como prometió, un conjunto de nucleasas con dedos de zinc que actuaban en un punto próximo a la secuencia clave de 32 nucleótidos del gen *CCR5*. (Debido a que el objetivo era desactivar el gen *CCR5*, no importaba si reproducíamos con exactitud la mutación genética natural siempre que la proteína resultante dejase de funcionar.) Junto con Elena Pérez, por entonces becaria posdoctoral en nuestro laboratorio, demostramos que la infección por el VIH en sí misma podría contribuir a la regeneración del sistema inmunitario y hacerlo más resistente al virus. Nuestros experimentos de laboratorio revelaron que, incluso cuando se partía de un bajo número de linfocitos T con los genes *CCR5* desactivados (mediante nucleasas con dedos de zinc) en los cultivos, las células alteradas reponían y estabilizaban la población de linfocitos T tras la exposición al VIH. En cambio, el VIH destruyó los linfocitos T no modificados, con receptores CCR5 funcionales. En otras palabras, el VIH eliminó los linfocitos T vulnerables y dejó que los deficientes en CCR5 se multiplicaran. Y precisamente esas células son las que ofrecen resistencia al VIH, por lo que pueden funcionar como células inmunitarias y proporcionar protección frente a las infecciones.

Nuestros resultados preliminares en un ensayo de seguridad con humanos han sido prometedores. Bajo la dirección de Pablo Tebas, el médico responsable del estudio en Filadelfia, en verano de 2009 se realizó a un primer paciente una perfusión de sus propios linfocitos T con los receptores CCR5 alterados. Desde entonces, hemos tratado a 11 voluntarios seropositivos más en un estudio promovido por los NIH. Sangamo está llevando a cabo un ensayo similar en la costa oeste de EE.UU. Aunque por sus características tales estudios de seguridad no están diseñados para demostrar la eficacia del tratamiento, hasta la fecha hemos observado que todos los pacientes presentaban en los análisis de sangre un mayor número de linfocitos T coadyuvantes en comparación con la situación inicial, una señal de que la estrategia tal vez esté protegiendo a los linfocitos. Además, en el tejido linfático de los intestinos y en la sangre se han identificado linfocitos T coadyuvantes sin receptores CCR5 funcionales. Esas células solo podían derivarse de las células reimplantadas, modificadas con las nucleasas de dedos de zinc.

El siguiente paso consiste en poner a prueba la capacidad de las células inmunitarias recién alteradas para combatir las partículas del VIH que ya están presentes en el organismo. Para ello, estamos empleando una estrategia bien aceptada, aunque de enormes consecuencias. Bajo la estrecha vigilancia de los médicos del estudio, tenemos la intención de que nuestros voluntarios abandonen la medicación contra el VIH para observar su evolución. Cuando lo hizo durante 12 semanas uno de nuestros pacientes tratados, que había heredado un solo gen *CCR5-Delta32* (lo que le daba una ligera ventaja natural), no hallamos indicios del virus en su sangre o en los tejidos linfáticos al final de los tres meses sin antivíricos. Los pacientes tratados más recientemente están en mitad del régimen posterior a la perfusión y se les está realizando un seguimiento que se prevé finalizará a lo largo del próximo año. Se han planeado otros ensayos clínicos para evaluar la eficacia de la nueva técnica. De tener éxito, el método de la nucleasa con dedos de zinc podría resultar mucho menos caro que el trasplante de médula ósea deficiente en CCR5, muy difícil de lograr, o el tratamiento farmacológico de por vida contra el VIH.

Solo unos pocos años atrás, la idea de desarrollar tratamientos seguros, eficaces y menos caros que mantuvieran a raya el VIH a largo plazo sin necesidad de fármacos era una visión que pocos nos atrevimos a soñar. Incluso si nuestras nucleasas con dedos de zinc diseñadas a la medida no ofrecen la curación, creemos que podrían representar la estrategia que más cerca ha estado de cerrarle el paso al VIH en 30 años.

PARA SABER MÁS

Establishment of HIV-1 resistance in CD4+ T cells by genome editing using zinc-finger nucleases. Elena E. Pérez et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 26, págs. 808-816, 2008.

Long-term control of HIV by CCR5 delta32/delta32 stem-cell transplantation. Gero Hütter et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 360, n.º 7, págs. 692-698, 12 de febrero de 2009.

Chemokine receptor 5 knockout strategies. Paula Cannon y Carl June en *Current Opinions in HIV and AIDS*, vol. 6, n.º 1, págs. 74-79, enero de 2011.

The man who had HIV and now does not. Tina Rosenberg en *New York Magazine*, 29 de mayo de 2011.

Sociedades profesionales de terapia celular y génica: Sociedad Americana de Terapia Génica y Celular (**www.asgt.org**) y Sociedad Internacional de Terapia Celular (**www.celltherapysociety.org**)



por Claudia Kalb



La placenta no solo alimenta a la descendencia en el útero, sino que además moldea el desarrollo del cerebro

La placenta es un órgano extraordinario, esencial para la vida humana, pero fugaz. En su breve tiempo de duración actúa como una barrera protectora vital para el feto. Sus vasos sanguíneos —que se asemejan a las raíces de los árboles en esta imagen de Norman Barker, profesor de patología en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins— también suministran el oxígeno y nutrientes desde la madre hacia el bebé en desarrollo. Sin embargo, la importancia de la placenta se ha infravalorado en gran medida. Los que la estudian en detalle han descubierto que representa mucho más que un simple conducto: protege al feto y moldea el desarrollo neurológico.

En un estudio publicado el verano pasado, investigadores británicos demostraron que cuando se priva de alimento a una hembra de ratón gestante, la placenta se autodestruye para nutrir al cerebro del feto. Por otro lado, un equipo del Instituto Neurogenético Zilkha (ZNI), en la Universidad de Carolina del Sur, y otros colaboradores echaron abajo un dogma de la biología de varios decenios de antigüedad cuando anunciaron que la placenta, y no la madre, suministraba la hormona serotonina al prosencéfalo del feto en su desarrollo inicial. Debido a que las hormonas desempeñan una función esencial en las interconexiones neuronales del cerebro, incluso antes de que actúen como neurotransmisores, las alteraciones en la placenta pueden influir en el riesgo de padecer depresión, ansiedad e incluso autismo. Según Pat Levitt, director del ZNI y coautor del estudio, debemos prestar mayor atención a la salud y buen funcionamiento de la placenta.

La disciplina que investiga la influencia de la placenta en el desarrollo del cerebro es tan nueva que aún no ha recibido nombre alguno. Anna Penn, neurobióloga del desarrollo y neonatóloga de la Universidad Stanford, la ha denominado «neuroplacentología». Penn está estudiando el efecto de las hormonas placentarias en el desarrollo cerebral del feto desde la vigésima semana de gestación. En concreto, intenta identificar cómo se ven afectados los bebés prematuros por la retirada de las hormonas tras el parto y, en última instancia, busca una manera de compensar ese déficit. La antigua forma de entender la placenta está cambiando, dice Penn, pero todavía hay mucho que aprender.

NORMAN BARKER

por Joshua Knobe

Joshua Knobe es profesor de filosofía en la Universidad de Yale y uno de los fundadores de la filosofía experimental.



Filosofía experimental

Una nueva escuela propone ir más allá del pensamiento puro. Algunos experimentos cognitivos podrían ayudar a dilucidar sobre la naturaleza del libre albedrío o la del bien y el mal

Piense en la filosofía como disciplina y le vendrán a la mente cierto tipo de imágenes: tal vez la de alguien que, sentado en un sillón, se abisma en sus pensamientos y esconde la cabeza entre grandes libros; o quizá la conciba como un campo de erudición, abstruso por naturaleza y sin contacto alguno con la ciencia. En todo caso, es probable que no la asocie a gente que realiza experimentos.

Sin embargo, y por insólito que parezca, una nueva escuela de filósofos jóvenes ha comenzado a hacer precisamente eso. Los filósofos experimentales sostienen que la indagación filosófica puede apoyarse en los estudios empíricos que investigan el modo en que piensan y sienten las personas. Para ello se valen de todos los métodos de la ciencia cognitiva contemporánea: dirigen experimentos, trabajan en equipo con psicólogos y publican en revistas que, en un principio, estuvieron concebidas para científicos. El resultado ha supuesto una especie de revolución. Aunque este movimiento nació hace apenas unos años, ya ha generado cientos de artículos, un raudal de logros sorprendentes y encendidas opiniones a favor y en contra.

Todo lo anterior quizá le resulte extraño. Parecería que los filósofos hubiesen renegado de su propia disciplina y se dedicasen ahora a algo diferente. Sin embargo, la propuesta no es tan extravagante como parece. En todo programa de investigación, los científicos emplean ciertos instrumentos (telescopios en astronomía, microscopios en biología, etcétera). Lo normal es que no se pierdan en consideraciones sobre los instrumentos en sí, sino que los usen sin más, con la intención de acceder a una esfera de la realidad a la que se presupone dotada de una existencia autónoma. En ocasiones, sin embargo, los investigadores se sienten confundidos por la información que les llega de sus aparatos: quizá porque esta parece inverosímil, opuesta a las teorías establecidas, o intrínsecamente contradictoria. Cuando eso ocurre, muy a menudo resulta útil dejar a un lado la realidad objeto de estudio y examinar con detalle los instrumentos. A veces, la mejor manera de resolver un problema en astronomía pasa por analizar a conciencia el funcionamiento del telescopio.

Los filósofos no solemos emplear telescopios ni microscopios. Confiamos casi por completo en un instrumento muy especial: la mente humana, el objeto que engendra las ideas de las que se ocupa nuestra profesión. Con todo, el mismo principio básico se aplica también aquí. De ordinario, no nos preocupamos demasiado por el funcionamiento de nuestra mente: simplemente la usamos para acceder a una realidad independiente de ella. Pero, a veces, este enfoque fracasa. Nuestra mente parece empujarnos en dos direcciones distintas, como si en nuestro interior dos voces diesen respuestas diferentes a una misma pregunta. En tales casos, quizá resulte provechoso explorar la mente y examinar, desde un punto de vista científico, el origen de nuestras intuiciones filosóficas.

Es aquí donde irrumpe la filosofía experimental. Esta propone que, si logramos profundizar en la psicología subyacente a las intuiciones filosóficas, podremos discernir mejor qué intuiciones merecen nuestra confianza y cuáles debemos desechar como poco fiables o engañosas.

Nuestro objetivo consiste en entender mejor las ideas que los individuos se forman sobre las grandes preguntas filosóficas. ¿De dónde procede la creencia en el libre albedrío? ¿Vemos como verdades objetivas nuestras propias reivindicaciones morales? En última instancia, los resultados de esta línea de investigación podrían acarrear consecuencias para la jurisprudencia, la ética y otros campos.

El libre albedrío

Imagine que acaba de presenciar un asesinato. En un principio, puede que le parezca obvio que el asesino cargue con la responsabilidad moral de sus actos y que, por tanto, merezca ser castigado. Pero considere ahora la situación desde un punto de vista filosófico. Es probable que la acción del asesino respondiese a ciertos estados mentales, los cuales, a su vez, se debiesen a otros acontecimientos previos. Visto así, el crimen no representaría sino el último eslabón de una larga cadena causal que se remonta a los genes y al entorno del asesino. Ahora bien, si de verdad fue esa secuencia lo que le llevó a perpetrar el crimen, ¿puede ser él moralmente responsable de su acción? Algunos filósofos sostienen que sí; otros lo niegan. Se trata del eterno problema sobre el libre albedrío, un debate que se antoja interminable.

El filósofo experimental Shaun Nichols, de la Universidad de Arizona, y yo creemos que el conflicto emerge como fruto de una tensión entre dos procesos cognitivos. Quizá nuestra capacidad para la reflexión abstracta y teórica nos induzca a pensar de un modo; sin embargo, nuestra respuesta emocional inmediata nos mueve en la dirección opuesta. Un impulso nos dice: «Bueno, desde un punto de vista racional, su comportamiento se debe a una compleja cadena causal. Por tanto, él nunca puede ser verdaderamente libre ni responsable». En ese momento, se inmiscuye el punto de vista emocional: «¡Este hombre es un asesino y solo cabe culparle por lo que acaba de hacer!».

Nichols y yo diseñamos un experimento que consistía en invitar a cada participante a reflexionar sobre un universo ficticio, el *universo A*, en el que todos los actos de cualquier individuo quedaban determinados por una cadena causal de acontecimientos pasados. Después, dividimos a los probandos en dos grupos. A



FOTOGRAFÍA DE ZACHARY ZAVISLAK, COMPOSICIÓN WENDY SCHELAH

los primeros se les formuló una pregunta concebida para suscitar la reflexión teórica:

En el universo A, *¿puede un individuo ser plenamente responsable de sus actos desde un punto de vista moral?*

A los pertenecientes al segundo grupo se les planteó una historia muy concreta e incluso escabrosa, a fin de provocar en ellos una respuesta emocional:

En el universo A, *un individuo llamado Bill se siente muy atraído por su secretaria. Decide que el único modo de vivir con ella es matar a su propia esposa y a sus tres hijos. Bill sabe que, en caso de incendio, resulta imposible escapar de su casa, por lo que antes de partir para un viaje de trabajo instala un dispositivo que prende fuego a la vivienda y asesina a su familia. ¿Es Bill plenamente responsable desde un punto de vista moral de haber matado a su mujer e hijos?*

Aquellos a quienes se les formuló la pregunta en términos teóricos se sintieron más inclinados a responder que no: nadie puede ser moralmente responsable en un universo determinista. Por el contrario, a quienes se les planteó la segunda opción, se decantaron con mayor facilidad hacia la postura contraria: Bill cargaba con la responsabilidad de sus actos. En otras palabras, una reflexión abstracta nos lleva a exonerar de toda responsabilidad moral a los habitantes de un universo determinista; sin embargo, ante una historia en la que un individuo concreto perpetra un acto cruel, no dudamos en hacerle responsable, con total independencia del universo en el que le haya tocado vivir.

Aunque este primer estudio solo se efectuó sobre unas pocas docenas de estudiantes, durante los años siguientes se realizaron numerosos intentos de investigar el fenómeno con rigurosidad. Un estudio posterior se llevó a cabo sobre una muestra mucho más amplia (más de 1000 participantes). Otro analizó cómo respondían al planteamiento más abstracto individuos procedentes de varias culturas (India, Hong Kong, Colombia y EE.UU.). Los resultados se repitieron. Llegados a este punto, parecía que habíamos dado con una especie de efecto genuino. Sin embargo, aún quedaba por determinar su origen. ¿Reflejaba dicho fenómeno alguna diferencia entre el pensamiento abstracto y el concreto? Para profundizar en la cuestión, necesitábamos estudios que se valieran de métodos diferentes.

Uno de los más sorprendentes y elegantes fue dirigido por la filósofa experimental Christine Weigel, de la Universidad de Utah Valley. A los participantes se les pidió que imaginasen una conferencia filosófica sobre el problema del libre albedrío. En dicha ponencia se exponía en líneas generales el problema y se concluía con el mismo ejemplo descrito arriba: el de un habitante de un universo determinista que asesina a su mujer y a sus hijos. Sin embargo, Weigel introdujo una variación muy sutil: a algunos participantes se les dijo que la conferencia tendría lugar «dentro de unos años»; al resto, que la charla se impartiría «dentro de unos días».

Puede que este amaño no guarde demasiada relación con el libre albedrío, pero sí tiene mucho que ver con el conocimiento humano. Numerosos estudios han demostrado que imaginar un acontecimiento distante en el tiempo estimula procesos cognitivos más abstractos, teóricos y profundos. Según esto, la referencia a un futuro más lejano debería estimular un tipo de proceso más reflexivo («Bueno, desde un punto de vista racional...»), mientras que el planteamiento de una situación inminente desencadenaría intuiciones más concretas («¡Este hombre es un asesino!»). Weigel halló que dicha manipulación modificaba la intuición de los probandos: aquellos a quienes se les hizo imaginar la situación en un futuro distante fueron menos proclives a afirmar que a los humanos de un universo determinista se les hubiesen de exigir responsabilidades morales.

Cada vez parece más verosímil que la perplejidad y el conflicto interior que se derivan del problema del libre albedrío se deben, en realidad, a una tensión entre nuestros juicios abstractos y nuestras respuestas emocionales más concretas. Además, la situación en la que una persona se halla en un momento dado influye de manera considerable a la hora de adoptar una postura u otra.

Desde luego, el hecho de que esta hipótesis se haya visto apoyada por varios estudios no demuestra su veracidad. El filósofo experimental Eddy Nahmias, de la Universidad estatal de Georgia, ha propuesto una explicación alternativa que no implica conflicto alguno entre la razón y la emoción. En general, se admite que los indicios empíricos existentes aún no bastan para dar respuesta a todas las preguntas. Pero, en cualquier caso, de lo que no cabe duda es de que, como mínimo, ahora contamos con un punto de partida. Aunque aún queda mucho camino por andar, disponemos de un programa de investigación experimental para indagar en las raíces psicológicas del problema del libre albedrío.

¿Es relativa la moral?

Aunque hasta ahora hemos considerado cuestiones que quizá parezcan algo abstrusas o académicas, la filosofía experimental puede también contribuir a aclarar cuestiones fundamentales en las controversias contemporáneas sobre la moral.

Imaginemos que Sven y Xiex provienen de culturas diferentes. Para Sven, golpear a otras personas es moralmente malo. Xiex, por el contrario, opina que golpear al prójimo no plantea problema alguno, pues no supone sino la manera más directa de demostrar nuestra fuerza y bravura. He aquí una cuestión compleja: dado que Sven y Xiex poseen opiniones opuestas, ¿se equivoca necesariamente uno de ellos? ¿O no existe una única respuesta, sino que cada uno tiene razón, habida cuenta del sistema de valores de su propia cultura?

De entre todas las cuestiones discutidas por los filósofos, esta ha sido una de las que más ha polarizado el debate occiden-

¿Nueva metodología o nueva terminología?

En tiempos de Francis Bacon (1561-1626) ya se usaba la expresión *filosofía experimental*. Designaba una forma de investigación basada en la experiencia y en el método inductivo. Sir Isaac Newton (1642-1727) utilizaba esta expresión para referirse al tipo de ciencia que él mismo practicaba. Equivalía aproximadamente a lo que hoy llamamos ciencias físicas o ciencias naturales.

Sin embargo, en el presente artículo, la expresión se usa en un sentido distinto, para referirse a una nueva forma de hacer filosofía. Los filósofos suelen trabajar con ideas y conceptos, utilizando exclusivamente la reflexión y el diálogo, la lectura y la escritura. Es lo que Joshua Knobe denomina filosofía de sillón. La *filosofía experimental* se entiende aquí como un nuevo método filosófico que incluiría la realización de experimentos. Pero el punto crítico aparece hacia el final del texto: ¿quemamos o no quemamos el sillón? El propio autor se da cuenta de que, tras los experimentos, los auténticos problemas filosóficos (¿somos o no libres?, ¿es correcto o erróneo el relativismo?) están aun sin tocar. Es decir, tras los experimentos, todavía queda por hacer todo el trabajo reflexivo, dialéctico y crítico propio de la filosofía.

Es cierto que la filosofía haría muy bien en contar con la psicología y con las ciencias cognitivas. Pero no está tan claro que se esté haciendo filosofía *mientras* se llevan a cabo los experimentos. Más bien parece que se hace psicología o ciencia cognitiva, y que *después* los resultados son tomados en cuenta para hacer filosofía. A eso se le puede llamar, si se quiere, filosofía experimental, pero quizá podríamos hablar simplemente de un uso filosófico de los resultados de las ciencias empíricas. Y, por cierto, a los filósofos también les parecen muy iluminadores los resultados de la física, la biología y otras ciencias, no solo de las que estudian la mente. Queda, pues, abierta la cuestión: ¿estamos ante una nueva metodología, o ante un nuevo nombre para la tradicional colaboración entre estudios empíricos y filosóficos?

Alfredo Marcos
Universidad de Valladolid

tal. Pensadores de varia índole sugieren a menudo que no existe una única verdad moral: esta sería, desde un punto de vista fundamental, algo relativo. Otros, más conservadores, insisten en la existencia de verdades morales objetivas. En cierta ocasión, el papa Benedicto XVI declaró que el relativismo moral conduce «a la confusión moral e intelectual, a una degradación de las normas, al menoscabo de la propia dignidad e incluso a la desesperación».

En un intento de llegar a las raíces psicológicas de esta controversia, el psicólogo Edward T. Cokely, de la Universidad de Tecnología de Michigan, y el filósofo Adam Feltz, de la Universidad Schreiner, realizaron un estudio en el que los participantes debían escuchar una historia sobre dos personas que diferían en sus puntos de vista sobre cierta cuestión moral. Después, preguntaban a los sujetos si alguno de ellos estaba equivocado o si, por el contrario, no existía una única postura correcta. Además, el estudio de Cokely y Feltz introdujo una modificación interesante: se sometió a cada participante a un test normalizado para evaluar el rasgo de la personalidad conocido como «apertura a la experiencia». Los resultados mostraron una clara correlación: cuanto más abierto a la experiencia era un probando, más tendía a suscribir la respuesta relativista.

Tales estudios sugieren que la inclinación que algunos individuos sienten hacia el relativismo moral quizá dependa de su grado de apertura. Al considerar otras perspectivas y otras posibles formas de ver la vida, las personas se sienten tanto más atraídas por una postura relativista cuanto más se abren a dichas posibilidades y participan de ellas a través de la imaginación.

Los psicólogos Geoffrey Goodwin, de la Universidad de Pennsylvania, y John Darley, de la Universidad de Princeton, catalogaron la manera de pensar de sus probandos tras proponerles un rompecabezas lógico que requería colocar un conjunto de bloques de cierta manera. Aunque a primera vista el problema parecía sencillo, escondía un ardid: solo se podía solucionar si se analizaba desde varias perspectivas. El objetivo consistía en relacionar la capacidad de una persona para resolver el rompecabezas y sus intuiciones sobre el relativismo moral. Por sorprendente que parezca, los investigadores hallaron de nuevo una correlación entre ambas: quienes lograron armar el rompecabezas se mostraron más propensos a adherirse a la opinión relativista.

Vemos, por tanto, que varios estudios dirigidos por distintos investigadores y realizados con métodos diferentes parecen apuntar hacia la misma conclusión: las personas se sienten atraídas hacia el relativismo en la medida de su capacidad para abrirse a otras perspectivas. Este resultado tal vez nos ayude a profundizar en una de las controversias filosóficas más persistentes de nuestro tiempo.

¿Deberíamos quemar el sillón?

Supongamos ahora, aunque solo sea por un momento, que la filosofía experimental continúa progresando. Imaginemos que todas nuestras preguntas empíricas se resuelven y que, algún día, logramos entender con suma precisión los procesos cognitivos que yacen bajo los diferentes puntos de vista filosóficos. Aun entonces cabría pensar que no hemos abordado la verdadera pregunta filosófica: a saber, si tales puntos de vista son correctos o erróneos. Semejante cuestión ni siquiera parece pertenecer a la clase de problemas que admitirían un tratamiento empírico. Antes o después, alguien habrá de volver al sillón para reflexionar sobre los aspectos filosóficos puros.

Lo anterior constituye una conclusión clara y razonable que todo filósofo debería complacerse en aceptar. No obstante, cometeríamos un craso error si la empleásemos para arremeter contra todo el programa de la filosofía experimental. Nadie sugiere que los filósofos deban abandonar otras formas de pensamiento para, en su lugar, dedicarse a realizar experimentos. Pero sí defendemos que el trabajo experimental debería formar parte de una investigación filosófica más amplia. La filosofía experimental aporta un instrumento más a la caja de herramientas del filósofo. Y, cuando nos reclinemos en el sillón para analizar la tensión existente entre nuestras creencias, puede que nos resulte muy provechoso, si no indispensable, entender en detalle los procesos cognitivos que las originan.

PARA SABER MÁS

Cerebro y libre albedrío. Michael Pauen en *Mente y Cerebro*, vol. 1, 2002.
Experimental philosophy. Dirigido por Joshua Knobe y Shaun Nichols. Oxford University Press, 2008.
Free will and the bounds of the self. J. Knobe y S. Nichols en *The Oxford handbook of free will*, por R. Kane (ed). Oxford University Press, 2011.

por John P. A. Ioannidis



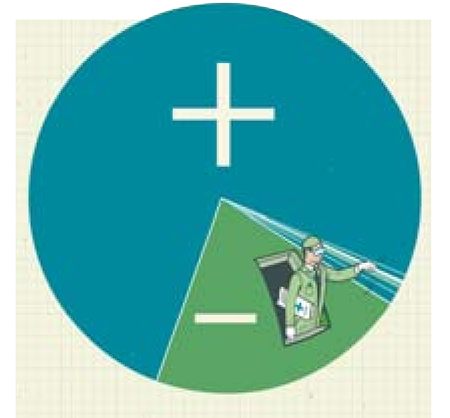
John P. A. Ioannidis ocupa la cátedra C. F. Rehnborg de prevención de enfermedades en la facultad de medicina de la Universidad Stanford. También allí dirige el Centro de Investigación para la Prevención e imparte clases de medicina y de investigación y política sanitaria.

Una epidemia de falsos positivos

La competencia y los conflictos de intereses distorsionan demasiados hallazgos médicos

Los falsos positivos y los resultados exagerados en los estudios científicos han alcanzado proporciones epidémicas en los últimos años. El problema es galopante en economía, ciencias sociales y ciencias naturales, pero resulta particularmente mayúsculo en biomedicina. Numerosos estudios que reivindican el beneficio de algún fármaco o tratamiento han resultado no ser ciertos. Solo hay que echar un vistazo a los hallazgos contradictorios sobre los betacarotenos, la vitamina E, las terapias hormonales, el analgésico Vioxx y el antidiabético Avandia. Incluso cuando los efectos se han demostrado, estos resultan ser más débiles de lo anunciado.

El problema comienza con el aumento de las expectativas del público. Como seres humanos, los científicos están tentados de mostrar que saben más de lo que saben. El número de investigadores (y el número de experimentos, observaciones y análisis que producen) también ha aumentado de forma exponencial en numerosos ámbitos, pero faltan las garantías adecuadas contra los sesgos. La investigación está fragmentada, la competencia es feroz y con frecuencia se hace hincapié en estudios individuales en lugar de analizar el panorama general.



BEN GIBSON

Un gran número de investigaciones se acometen por razones diferentes a la búsqueda de la verdad. Los conflictos de intereses abundan e influyen en los resultados. En el ámbito médico, los estudios se realizan con frecuencia a instancias de empresas con un gran interés económico en los resultados. Incluso para los académicos, el éxito depende a menudo de la publicación de datos positivos. El oligopolio de las publicaciones de gran impacto conlleva además un efecto distorsionador en la financiación, las carreras académicas y las cuotas de mercado. La industria adapta a sus necesidades los programas de investigación, lo que además determina las prioridades académicas, los ingresos de la publicación e, incluso, la financiación pública.

La crisis no debe debilitar la confianza en el método científico. La capacidad de demostrar que algo es falso sigue siendo una característica de la ciencia. Pero los científicos debemos mejorar la manera en que investigamos y el modo en que difundimos los resultados.

En primer lugar, debemos exigir de forma rutinaria una validación externa sólida y amplia (en forma de estudios adicionales) de cualquier informe que afirme haber descubierto algo nuevo. En muchos campos se tiene poco en cuenta la necesidad de replicación o esta se lleva a cabo de forma irregular y poco sistemática. En segundo lugar, los informes científicos deberían considerar el número de análisis realizados. Ello tendería a minimizar los falsos positivos; aunque también supondría que algunos hallazgos válidos podrían pasarse por alto. Aquí es donde las grandes colaboraciones internacionales pueden resultar indispensables. La epidemiología genómica en humanos goza de una trayectoria sólida porque varios consorcios a gran escala validan de forma rigurosa los factores de riesgo genéticos.

La mejor manera de garantizar que se verifiquen los resultados de las pruebas sería que los científicos registraran sus protocolos experimentales antes de comenzar sus investigaciones y que revelaran los resultados y los datos completos cuando la investigación hubiera concluido. En la actualidad, los resultados se notifican de forma selectiva: se destacan los más llamativos. Y las personas ajenas a la investigación no suelen tener acceso a los datos necesarios para repetir los estudios. Las publicaciones y agencias de financiación deben fomentar la disponibilidad pública de los datos y métodos de cada documento publicado. También sería útil que los investigadores declararan las limitaciones de sus resultados o los defectos inherentes al diseño de sus experimentos. Del mismo modo, científicos y patrocinadores deberían ser rigurosos en la declaración de conflictos de intereses.

Algunos ámbitos han adoptado uno o varios de esos mecanismos. Los grandes consorcios internacionales se están convirtiendo en algo habitual en epidemiología; publicaciones como *Annals of Internal Medicine* y *Journal of the American Medical Association* piden a los autores que describan las limitaciones del estudio; y muchas publicaciones preguntan sobre los conflictos de intereses. Sin embargo, la aplicación generalizada de estas medidas no será sencilla.

Muchos científicos implicados en trabajos de gran repercusión se negarán a revelar tantos detalles. Y lo que es más importante, numerosas investigaciones fundamentales ya se han dejado en manos de las industrias farmacéutica y biomédica, que en ocasiones pueden diseñar y publicar los estudios de manera que resulten más favorables para sus productos. La situación es vergonzosa. El aumento de la inversión en la investigación poblacional y clínica basada en datos científicos, por ejemplo, no debería diseñarlo la industria, sino expertos carentes de conflictos de intereses materiales.

Por último, los datos que puedan condicionar medidas terapéuticas deberían ir acompañados de cualquier incertidumbre que los rodee. Es totalmente aceptable para pacientes y médicos seguir un tratamiento basado en una información con solo un uno por ciento de posibilidades de ser correcta. Pero debemos ser conscientes del riesgo que ello entraña.

ENERGÍA

El futuro de la energía solar

Se espera que la generación fotovoltaica de electricidad desempeñe un papel fundamental en el cambio de modelo energético. Sin embargo, aún quedan grandes distancias por cubrir antes de que el sol reemplace a los combustibles fósiles

Bernd Müller



Colectores parabólicos en el complejo termosolar Andasol 1, cerca de Granada. Sus sistemas de almacenamiento térmico, pioneros en el sector, le permiten funcionar durante siete horas sin luz solar.

SCHOTT AG



Bernd Müller es físico y periodista. Escribe desde hace más de veinte años sobre ciencia e innovación.



La catástrofe acontecida el año pasado en la central de Fukushima contribuyó a alimentar el rechazo social y político a la energía nuclear. En Alemania, por ejemplo, el Gobierno aprobó el cierre de todas las centrales antes de 2022. Ese compromiso implicará reemplazarlas por otras fuentes de energía, pero ¿cuáles? Los combustibles fósiles incrementan el efecto invernadero. La energía eólica, aunque más limpia, requiere ocupar extensas superficies en el litoral y la montaña. Y el potencial de la energía hidráulica se encuentra prácticamente agotado en el país.

Por fortuna, existe una fuente de energía casi inagotable: cada año, el sol vierte sobre nuestro planeta 1,5 trillones ($1{,}5 \cdot 10^{18}$) de kilovatios hora, 15.000 veces más que la energía primaria consumida por toda la humanidad en 2006 (10^{14} kWh). El aprovechamiento de tal cantidad de energía se enfrenta, no obstante, a un inconveniente fundamental: su precio. La producción fotovoltaica, que emplea placas semiconductoras para transformar de manera directa la radiación solar en electricidad, constituye hoy por hoy la fuente de energía más cara, mucho más que la eólica o la hidráulica. Como consecuencia, durante los últimos años han aumentado las voces que piden enlentecer su expansión en beneficio de otros métodos de generación de electricidad.

La industria, por su parte, esgrime a su favor el enorme potencial técnico de la energía fotovoltaica. Dada la todavía escasa implantación de las centrales termosolares, la producción fotovoltaica constituye en la actualidad el pilar más sólido en el que se apoya el futuro de la energía solar. Una tercera forma de explotación de la luz solar la proporcionan los paneles empleados para calentar agua con fines domésticos, un método que viene demostrando sus ventajas —también económicas— desde hace ya varios años. En Israel, la instalación de calentadores solares en los edificios de nueva construcción es obligatoria desde hace tiempo.

Alemania es uno de los países líderes en energía solar fotovoltaica, tanto en lo que respecta a la fabricación de paneles como a la potencia instalada. Solo en 2010, se construyeron en el país módulos por unos 7,4 gigavatios (GW), casi tanto como durante los veinte años anteriores. Con ello, la potencia fotovoltaica instalada superó los 17 GW, casi la mitad de los 40 GW instalados en todo el mundo. ¿Por qué Alemania? El éxito del que goza esta fuente de energía en el país se debe a dos razones. En primer lugar, a la Ley de Energías Renovables (EEG, por sus siglas en alemán), vigente desde el año 2000. Esta garantiza al propietario de una planta una retribución fija durante 20 años, lo que supone un retorno sobre la inversión de entre el 5 y el 8 por ciento. Por otro lado, gran parte del desarrollo técnico que ha revolucionado el sector ha tenido su origen precisamente en Alemania, un país que cuenta con centros de investigación punteros, como el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE) de Friburgo, así como con grandes proveedores y fabricantes.

Pero ese idilio se encuentra en peligro. En agosto de 2011, los fabricantes de módulos fotovoltaicos sorprendieron al público con caídas de beneficios. También los topes en la aplicabilidad de la EEG frenaron a los inversores. Entre tanto, los fabricantes asiáticos han aumentado su producción y han provocado una caída de precios. Y aunque se espera que ello traiga consecuencias positivas para el sector, debido a la escasa competitividad de la producción fotovoltaica frente a los combustibles fósiles, las subvenciones seguirán siendo necesarias durante largo tiempo.

Manuel Frondel, del Instituto de Investigación Económica de Renania-Westfalia, cree que lo peor está aún por llegar. En Alemania, la deuda acumulada como consecuencia de la aplicación de la EEG asciende a 80.000 millones de euros, los cua-

EN SÍNTESIS

La energía solar desempeñará un papel clave en el modelo energético del futuro. Sin embargo, en el camino hacia su implantación definitiva aún queda un obstáculo por superar: su elevado precio.

La células fotovoltaicas cuentan con un amplio margen para las mejoras técnicas. La nanotecnología, las células multicapa y las de concentración prometen rendimientos mucho más elevados.

Por su parte, las centrales termosolares, basadas en la generación de calor, pueden dotarse de sistemas de almacenamiento energético que les permitan suministrar electricidad incluso durante la noche.

Algunos proyectos, como el propuesto por el consorcio Desertec, ya contemplan la construcción de gigantescas centrales solares en los desiertos del norte de África u otras regiones.



Miel solar: Las células fotovoltaicas en forma de colmena BeeHive PV, de la empresa israelí SolarOr, han sido diseñadas para cubrir las fachadas de cristal de los grandes edificios. Cada una de las placas hexagonales de doble recubrimiento acrílico contiene una célula de silicio sobre la que se focaliza la luz, lo que incrementa 2,5 veces su intensidad. Con un rendimiento del 14 por ciento, un panel de un metro cuadrado puede generar una potencia de unos 140 vatios.

les deberán abonarse antes de 2030. De los 3,5 céntimos por kilovatio hora que cada usuario paga por la electricidad de origen renovable, el 40 por ciento se destina a la producción fotovoltaica, a pesar de que la técnica solo cubre el 12 por ciento de la generación con renovables. Y aunque los 17 GW de potencia instalada parezcan una parte considerable de los 73 GW que necesita el país, la cantidad real depende de la hora y la estación del año. Por la noche o en un día nublado, el rendimiento de una central fotovoltaica resulta muy inferior a lo que sugiere su potencia nominal.

La verdadera contribución de la producción solar al acervo de las energías renovables resulta, hoy por hoy, bastante escasa. Las posibles mejoras dependen de una variedad de factores. Una hoja de ruta de la consultora Roland Berger para la Asociación Federal de la Industria Solar Alemana presupone que, de aquí a 2020, se instalarán módulos fotovoltaicos por una potencia nominal de entre 52 y 70 GW. Si bien el objetivo parece factible, debido sobre todo a la caída de los precios que han traído consigo los módulos asiáticos, aún será necesario ajustar la generación de electricidad y el consumo. Ello requerirá mejorar los sistemas de almacenamiento de energía por medio de células de hidrógeno, sistemas de aire comprimido o grandes baterías [*véase* «Atrapar el viento», por Davide Castelvecchi; Investigación y Ciencia, abril de 2012], así como disponer de una red inteligente que, por ejemplo, no ponga en funcionamiento la lavadora hasta que salga el sol. Por el momento, ninguno de estos factores ha sido considerado con suficiente detalle en los planes para ampliar la producción fotovoltaica; sin embargo, constituyen un requisito indispensable para que esta despegue.

El impacto que el uso de la energía solar pueda ejercer sobre el clima dependerá del desarrollo del sector a escala global. En este sentido, el futuro se antoja prometedor. Durante los últimos años, los dos países que más dióxido de carbono emiten, EE.UU. y China, han aumentado de manera considerable la construcción de centrales solares. En 2010, la potencia instalada en esos países superó el gigavatio, y se prevé que esa tendencia se acelere durante los próximos años.

CÉLULAS MÁS EFICIENTES

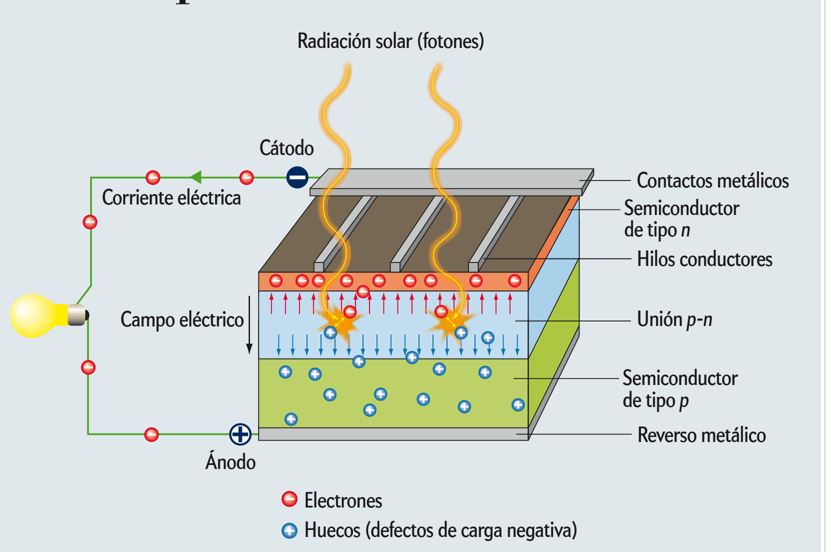
Eicke Weber, del Instituto Fraunhofer de Friburgo, se mostró sorprendido ante las previsiones que los fabricantes de módulos fotovoltaicos presentaron con ocasión de la feria Inter-

ASÍ FUNCIONA

Electricidad a partir de la luz

Una célula fotovoltaica básica consta de dos capas de material semiconductor: una de tipo *n*, la cual posee un pequeño exceso de electrones libres, y otra de tipo *p*, rica en «huecos» (defectos de carga negativa). Esta disposición asimétrica de cargas libres crea una diferencia de potencial permanente en la unión *p-n*, la región fronteriza entre amabas capas.

Cuando la luz incide sobre la célula, algunos de los electrones que se encontraban ligados adquieren la energía necesaria para moverse con libertad por el material. Estos pueden cruzar fácilmente hacia el lado *n* de la unión pero, debido a la barrera de potencial existente en la frontera, no hacia el contrario. Al unir ambas regiones por medio de un circuito externo, se genera de manera natural una corriente eléctrica.



SOLAR OR, ISRAEL (*células BeeHive PV*); SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT Y BUSKE-GRAFIK, SEGÚN ENERGIEAGENTUR NRW (*dibujo*)

Limpia, pero no pura

La energía fotovoltaica está considerada como una de las más respetuosas con el entorno. Sin embargo, cuenta con una chimenea invisible que emite no poco dióxido de carbono: la fabricación de células fotovoltaicas consume grandes cantidades de energía, por lo que arrastra tras de sí todas las emisiones asociadas a la electricidad que se necesita para manufacturarlas.

Con todo, el período de amortización energética de una célula fotovoltaica (el tiempo que tardará en generar la misma energía que se ha invertido en su fabricación) se ha reducido a la mitad durante los últimos cinco años. En la actualidad, oscila entre 6 y 36 meses, según el tipo y lugar de la instalación. Entre tanto, las emisiones han decrecido de manera proporcional. El material empleado desempeña un papel determinante, ya que la fabricación de semiconductores requiere mucha energía. Gracias al desarrollo de películas finas se ha avanzado también en esta dirección.

Otro aspecto conflictivo lo plantea la toxicidad de los materiales empleados. Los módulos de silicio no contienen metales pesados y las soldaduras actuales apenas utilizan plomo. Pero la situación es diferente en el caso de las células de telururo de cadmio, cada vez más populares debido a su bajo coste. El cadmio es tóxico, si bien empresas como First Solar aseguran que, en la forma compuesta empleada en las células, resulta inofensivo. Por su parte, los fabricantes de células de silicio se sienten agraviados por el hecho de que la directiva europea RoHS, que prohíbe el empleo de metales pesados en componentes electrónicos, haya hecho una excepción con las células fotovoltaicas. A su juicio, la medida desacredita a todo el sector.

Algunas empresas ya han comenzado a instalar plantas de reciclaje. Sin embargo, dado que la vida media de un módulo fotovoltaico se estima en unos veinte años, hasta el próximo decenio no se espera una cantidad apreciable de material reciclado. Hasta entonces, ¿habrán averiguado los usuarios domésticos de qué material se componen las placas de su tejado y cuál es la manera correcta de deshacerse de ellas?

solar 2011, celebrada en San Francisco. Algunos vaticinaron hasta 200 GW en nuevas instalaciones de aquí a 2020, lo que supondría un paso de gigante hacia la era solar. Si a semejante potencia se le sumase un número suficiente de centrales de almacenamiento, podríamos hallarnos ante las puertas de la deseada revolución energética.

Que ello también traiga consigo una revolución climática constituye objeto de debate. Frondel recuerda que, hasta ahora, ninguna planta fotovoltaica alemana ha conseguido reducir las emisiones netas de dióxido de carbono. Ello se debe a que la fabricación de módulos fotovoltaicos consume grandes cantidades de energía, las cuales se traducen en un enorme volumen de emisiones que solo se verían compensadas después de años de producción de energía limpia. Pero, además, un suministro masivo de energía de origen solar conduce a una caída de precios en los derechos de emisión, de manera que a los operadores de las plantas de carbón, sobre todo en el este de Europa, les resulta más económico comprar más créditos que modernizar sus centrales. Solo una restricción en los derechos de emisiones paralela a la expansión de las renovables traería consigo la deseada descongestión del clima.

Las discusiones económicas ocultan, sin embargo, el enorme potencial del que goza la energía fotovoltaica. Mientras que, después de 300 años de mejoras, las técnicas de producción de electricidad a partir de combustibles fósiles ya han alcanzado su cenit, el aprovechamiento de la energía solar apenas cuenta con unos decenios de antigüedad. Es cierto que algunas propuestas, como la producción directa de biocombustibles a partir de la luz del sol, necesitarán al menos una década antes de que puedan comercializarse. Sin embargo, cabe esperar que las continuas mejoras en la eficiencia de las células fotovoltaicas rindan pronto sus frutos. Además, el progresivo abaratamiento de los módulos implica una mayor rentabilidad para los inversores, lo que permitiría reducir la retribución fija de las subvenciones a las renovables que contemplan las leyes como la EEG.

Varias líneas de investigación que persiguen mejorar el rendimiento de las células fotovoltaicas se basan en el empleo de láseres durante el proceso de fabricación. Una de ellas, la técnica de emisores selectivos, permite controlar con gran finura la conductividad en las distintas regiones de la placa. En una célula fotovoltaica, la luz solar incidente libera electrones en el seno de una capa semiconductora. Para poder aprovecharlos en la generación de electricidad, esos portadores de carga deben ser redirigidos hacia finos canales conductores. A fin de aumentar su movilidad, es necesario dopar el semiconductor (introducir impurezas de forma controlada) con átomos de fósforo. Pero la concentración de impurezas solo debería ser alta en la zona situada inmediatamente debajo de los hilos conductores, ya que una conductividad elevada en las otras regiones provocaría la pérdida de demasiados portadores de carga. En una célula tradicional, el dopaje suele ser homogéneo en toda la capa, por lo que decidir su valor supone siempre cierto grado de compromiso. Pero un reparto adecuado de impurezas puede lograrse si los átomos de fósforo se introducen por medio de láseres. Este método incrementa la eficiencia de la placa en un 0,5 por ciento, lo que en las células comerciales actuales se traduce en un rendimiento final del 16,5 por ciento.

Otro método para mejorar la eficiencia de las células se basa en aumentar el área colectora de luz. En una célula fotovoltaica tradicional, los hilos conductores que guían a los portadores de carga se trazan sobre la capa semiconductora expuesta al sol, por lo que el área que cubren no puede generar electricidad. Para remediar esta deficiencia, los expertos del Instituto para Investigación de Energía Solar de Hameln y los del Instituto Fraunhofer perforan minúsculos agujeros conductores sobre la superficie, los cuales redirigen el flujo de portadores de carga hacia la cara posterior. No obstante, para minimizar la longitud del camino resulta necesario horadar un mínimo de un agujero por cada milímetro cuadrado. Eso significa que, en una placa de 15 centímetros de arista, han de perforarse más de 20.000 huecos. Por fortuna, un láser infrarrojo puede completar esa tarea en apenas unos segundos. La superficie desaprovechada (la que los agujeros roban a la placa fotovoltaica) no supera el uno por ciento.

Con todo, las técnicas anteriores solo incrementan el rendimiento de la célula en unas décimas de puntos porcentuales. Un



Eficiencia récord: Gracias a la técnica de generación fotovoltaica de concentración, la compañía californiana Solar Junction ha logrado que esta pequeña célula experimental de 30 milímetros cuadrados opere con una eficiencia del 43,5 por ciento. La placa absorbe una cantidad de luz equivalente a la que captaría una superficie 400 veces mayor.

SOLAR JUNCTION

método más prometedor lo proporcionan las células de concentración, las cuales emplean lentes para focalizar la luz sobre la capa semiconductora. Se espera que en 2015 este tipo de dispositivos generen, en todo el mundo, una potencia nominal de 1 GW. Si bien no parece demasiado, la técnica goza de un gran potencial en las zonas que cuentan con una insolación intensa.

Pero el verdadero potencial de las células de concentración se encuentra en su combinación con las células multicapa. Un módulo fotovoltaico transforma en energía eléctrica solo una parte del espectro electromagnético; por lo general, las regiones de longitud de onda larga. Los mejores rendimientos se han obtenido con luz infrarroja de unos 1000 nanómetros. Aunque una célula jamás podrá aprovechar todo el espectro, su eficiencia puede aumentarse de manera considerable si se apilan varias capas de material semiconductor, calibradas de tal manera que cada una de ellas trabaje con distintas longitudes de onda. Los dispositivos más comunes suelen incluir tres capas. En fecha reciente, una célula multicapa provista de un concentrador de 400 aumentos, fabricada por la estadounidense Solar Junction, logró una eficiencia récord del 43,5 por ciento. Con solo 5,5 milímetros cuadrados de lado, la placa absorbe una cantidad de luz equivalente a la que captaría una superficie 400 veces mayor. El coste de estos dispositivos, aún caros, podría reducirse si, en lugar de las capas semiconductoras habituales, se superpusiesen películas de nanocristales. Su grosor permitiría ajustar la sensibilidad de cada capa a diferentes longitudes de onda y su fabricación resultaría más sencilla y económica.

David Norris, de la Escuela Politécnica Federal (ETH) de Zúrich, estudia las propiedades de las células solares compuestas de nanomateriales. Por el momento, las células fabricadas por

Sol en el depósito de gasolina

Los colectores solares y las células fotovoltaicas permiten generar, respectivamente, calor y electricidad. Pero existe también una tercera posibilidad para aprovechar la energía del sol: la transformación directa de su luz en biomasa. Aunque pueda sonar a alquimia, las hojas de las plantas llevan a cabo ese proceso. La fotosíntesis artificial constituye uno de los proyectos más fascinantes en la investigación sobre energía solar, puesto que permitiría producir biocombustibles sin la necesidad de emplear tierra, agua ni abonos [*véase* «Hojas artificiales», por A. Regalado; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010].

Aldo Steinfeld, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH), ha construido un reactor solar que transforma agua y dióxido de carbono en un gas sintético que puede servir como fase previa para la síntesis de gasolina, queroseno y otros combustibles líquidos. Como el dióxido de carbono se ha extraído del aire, el balance neto de emisiones es nulo. Los combustibles líquidos pueden almacenarse, por lo que cabría producirlos en masa en regiones que gozan de una intensa insolación para ser transportados luego a otras partes del mundo.

El reactor solar de Steinfeld cuenta con una potencia de 2000 vatios. Concentra la luz solar 1500 veces y calienta a 1500 grados Celsius el recipiente donde se produce la reacción. El depósito contiene óxido de cerio, que, a tales temperaturas, libera átomos de oxígeno. En un segundo paso, a 900 grados, el óxido de cerio reducido reacciona con dióxido de carbono y vapor de agua; después, se combina de nuevo con el oxígeno liberado en la primera etapa y el ciclo comienza de nuevo. A través de un orificio en su base, el gas sintético abandona el tanque junto con oxígeno puro. Steinfeld explica que el combustible puede producirse con rapidez gracias a las altas temperaturas. Pero, como siempre, desde el laboratorio hasta la planta industrial queda aún un largo camino por recorrer. El primer reactor de un megavatio en una planta solar termoelétrica no se espera para antes de 2020.

Hyung Gyu Park, también del ETH, investiga con células de hidrógeno. Los procedimientos habituales para descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno solo son benignos con el entorno si para ello se emplea la luz solar. Sin embargo, resultan ineficientes, ya que la mayor parte de la energía se desaprovecha en la célula fotovoltaica, además de la que consume el proceso electroquímico. Por ello, Park investiga métodos para romper los enlaces del agua y producir hidrógeno directamente a partir de la luz solar. No obstante, su aplicación a gran escala se antoja aún muy lejana.

Abandero de la revolución solar

Eicke Weber, físico y experto en semiconductores, dirige desde 2006 el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar de Friburgo, el mayor instituto de investigación de energía solar en Europa. En esta entrevista nos explica por qué considera inevitable que la generación fotovoltaica desempeñe un papel fundamental en el cambio de modelo energético

Entrevista realizada por Bernd Müller

La salida de la energía nuclear ha llegado a Alemania antes de lo que se pensaba. ¿Podrá la energía solar llenar ese hueco?

Estoy convencido. Pero la razón por la que la energía solar se abrirá paso no tiene mucho que ver con la energía nuclear; llegará porque necesitamos una transición energética de todos modos. Ello se debe a dos motivos. Por un lado, y a pesar de que aún disponemos de bastantes reservas de petróleo, la brecha entre producción y demanda se ensancha cada vez más; los combustibles fósiles no pueden cubrir esa diferencia. Por otro, las emisiones de dióxido de carbono desestabilizan el clima. Vivimos, por así decirlo, en una erupción volcánica permanente. Un cambio hacia la producción renovable de energía resulta ineludible. Con ello matamos dos pájaros de un tiro.

Usted es, en cierto modo, un defensor «de oficio» de la energía solar, sobre todo de la fotovoltaica, la cual su instituto ha contribuido a desarrollar de manera decisiva. Sin embargo, los críticos esgrimen que la fotovoltaica es, precisamente, la más cara de todas las energías renovables.

Es cierto que la generación fotovoltaica se ha beneficiado de una gran cantidad de subvenciones, debido sobre todo a la Ley de Energías Renovables. Sin embargo, se trata de la técnica que goza de un potencial mayor. No solo por la cantidad de terreno aprovechable, sino por los grandes avances técnicos que se están desarrollando y las mejoras de rendimiento que prometen. Ello queda demostrado por la impresionante curva de aprendizaje que hemos visto hasta ahora.

¿A qué se refiere?

Las gráficas muestran la evolución del precio por vatio de potencia máxima a lo largo de los años. Los costes de los módulos disminuyen sin cesar, una tendencia tanto más pronunciada cuantas más centrales se han construido. Si los pronósticos de los fabricantes que se han citado en la feria Intersolar de San Francisco son ciertos, el verdadero *boom* está aún por llegar. De aquí a 2020, vaticinaban la adición de unos 100 gigavatios; algunos hablaban incluso de 200. En ese caso, la potencia instalada en todo el mundo podría ascender a unos 600 GW. Eso implicará tal caída de precios que los módulos casi podrán comprarse en masa en el supermercado.

¿Qué fracción del suministro mundial cubriría entonces la energía solar fotovoltaica?

Hoy la demanda asciende a unos 16 teravatios (16.000 GW) en todo el mundo. De aquí a 2050 se espera que aumente hasta los 30 TW, debido sobre todo al crecimiento de los países emergentes. Con un cálculo pesimista, podemos aventurar que la energía solar fotovoltaica aportará el 10 por ciento de esa cantidad; es decir, 3 TW. Para ello deberíamos instalar módulos por una potencia nominal de 12 TW, ya que la máxima generación de energía solo tiene lugar en condiciones de insolación óptima, y a eso hay que descontar los excedentes que no pueden usarse en el momento de la producción. Si en 2020 hemos llegado a los 600 GW, no debería haber problemas para alcanzar los 12.000 GW en 2050, ya que la capacidad de producción continúa aumentando de manera exponencial. En mi opinión, la generación fotovoltaica podría incluso llegar al 30 o 40 por ciento de la demanda en 2050. En Alemania, sumada a otras fuentes renovables de energía, ese suministro podría bastar para disponer de una generación de electricidad cien por cien sostenible.

Pero, para entonces, Alemania ya no constituirá el mayor mercado de la generación fotovoltaica.

su laboratorio alcanzan un rendimiento del 3 por ciento. Aunque aún exiguo, Norris se muestra convencido de que esa cifra pronto crecerá hasta el 10 por ciento, o quizá más si en su diseño se combinan células multicapa tradicionales. El obstáculo principal reside en los materiales necesarios para su fabricación, poco comunes y tóxicos. Norris investiga ahora cómo fabricar nanocristales a partir de coloides inofensivos. Sea como fuere, la nanotecnología desempeñará un papel fundamental en el desarrollo de las futuras células: el empleo de estructuras de tamaño muy inferior al de la longitud de onda de la luz permitirá nuevas formas de controlar su transformación en electricidad.

Con anterioridad a su incorporación a la ETH en 2010, Norris había trabajado como investigador en la Universidad de Minnesota. Allí, su equipo publicó en la revista *Science* un artículo que concitó gran interés entre la comunidad. Con el objetivo de aumentar el rendimiento de las placas, el estudio afrontaba el problema de los «electrones calientes» [*véase* «Siete propuestas innovadoras para la energía», por VV. AA.; Investigación y Ciencia, julio de 2011]. Como hemos mencionado, la generación fotovoltaica aprovecha solo las longitudes de onda largas. Sin embargo, ello no se debe a que los fotones de mayor frecuencia no liberen electrones: sí lo hacen, pero entonces los portadores de carga poseen un exceso de energía que, en billonésimas de segundo, se disipa en forma de calor. Eso aumenta la temperatura de la célula y reduce su eficiencia de modo considerable.

En su artículo, Norris y sus colaboradores propusieron un método para que los electrones no se enfriasen hasta que abandonasen el semiconductor. A tal fin, emplearon nanoestructuras de seleniuro de plomo en combinación con una capa de dióxido de titanio. Esta configuración incrementaba el ancho de la


Eicke Weber

Cierto. Por ahora, Alemania construye más plantas fotovoltaicas que ningún otro país. En 2010 se agregaron 7,4 GW a la red, con lo que la potencia instalada en el país ascendió a unos 18 GW, frente a los 40 que operan en todo el mundo. Esa situación está cambiando. Mientras que en Alemania el incremento se mantiene constante, otros países están viviendo una verdadera explosión. EE.UU. y China sobrepasarán pronto el umbral del gigavatio, y dentro de unos tres años probablemente dejen atrás a Alemania. El compromiso de China resulta gratificante: las subvenciones del Gobierno están sentando las bases de una verdadera revolución energética.

Entre los primeros veinte fabricantes mundiales solo se encuentra una empresa alemana, frente a siete chinas. ¿Le preocupa la oferta de módulos baratos procedentes del país asiático?
No. En 2010, de los 7 GW de generación fotovoltaica que se instalaron en el país, solo 2,5 procedían de módulos alemanes. Sin los bajos precios ofertados por China no se habría producido una expansión semejante, ni en Alemania ni en ningún otro lugar. Por otro lado, las empresas alemanas son hoy tan competitivas como antes, sobre todo en lo que se refiere a la cadena de producción. Los módulos chinos se fabrican con máquinas de origen alemán. Por supuesto, en Alemania nos interesa mantener el liderazgo tecnológico, algo que solo ocurrirá con constantes inversiones en investigación y desarrollo.

«Inventado en Alemania, fabricado en China». ¿Ve así el futuro del sector?
No resulta tan sencillo. El mejor ejemplo quizá lo hallemos en Concentrix, un subproducto de la investigación realizada en el Instituto Fraunhofer, que se basaba en superponer varias capas semiconductoras a fin de transformar en electricidad un amplio espectro de frecuencias. Gracias a este diseño, nuestro instituto obtuvo en 2009 un rendimiento récord de más del 40 por ciento. Sin embargo, hoy el liderazgo ha pasado a manos de EE.UU. Entre tanto, la francesa Soitec ha comprado Concentrix, gracias a lo cual construirá en San Diego la mayor central fotovoltaica del mundo, con 150 MW de potencia.

Pero incluso los módulos Concentrix sufren un inconveniente: por la noche no generan electricidad.
En cualquier caso puedo garantizarle que mañana, como cada día, saldrá el sol. En cambio, nadie puede asegurar que vaya a soplar el viento. La energía fotovoltaica implica una planificación más segura que la eólica. Además, la mayor parte del consumo eléctrico se produce durante el día, por lo que la diferencia entre la producción de energía solar y la demanda en la red no es tan exagerada como a veces se nos hace creer. No obstante, debemos desarrollar sistemas de almacenamiento. Al respecto, en el Instituto Fraunhofer estamos trabajando en técnicas de generación de hidrógeno y en otras, como la batería de flujo redox.

¿Qué papel desempeñan las grandes centrales termosolares?
La curva de aprendizaje para las centrales termosolares no se muestra tan prometedora. La técnica ya se ha desarrollado casi por completo y el precio no se situará muy por debajo de los cuatro euros por vatio de potencia instalada; mucho más que la fotovoltaica, que ya cuesta menos de un euro por vatio. Sin embargo, es cierto que las centrales termosolares con sistemas de almacenamiento en depósitos de sal resultan más económicas que los acumuladores eléctricos. En consecuencia, cabe considerar la construcción de plantas termosolares en España o el norte de África, como contempla el proyecto Desertec. Un modelo de generación fotovoltaica durante el día y de almacenamiento térmico por la noche constituye, sin duda, un proyecto interesante.

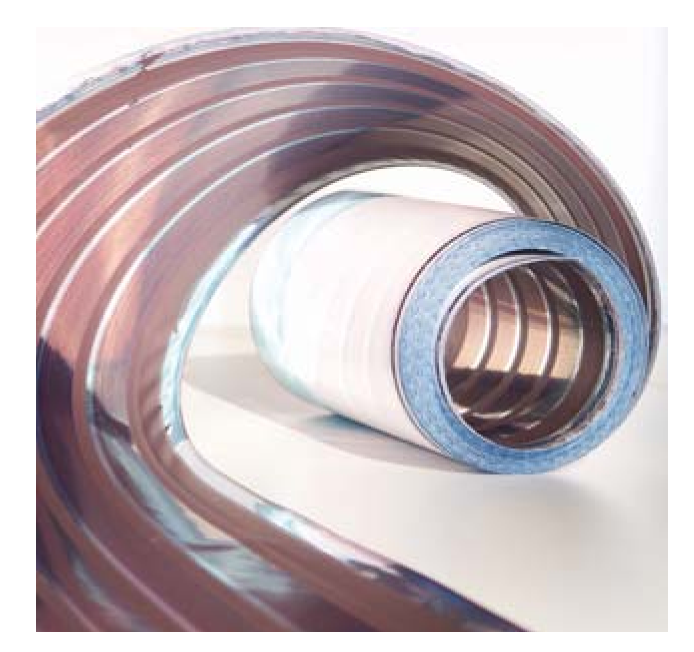
banda de energías prohibidas del semiconductor (la diferencia energética que un portador de carga debe superar para acceder a la banda de conducción y moverse con libertad). En esencia, ese incremento en el salto energético fuerza al electrón a conservar su energía hasta abandonar el material. Estas «células de silicio caliente» se convertirían en el dispositivo fotovoltaico definitivo: Norris calcula que su rendimiento podría llegar al 66 por ciento.

ENERGÍA TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA

La combinación de la generación térmica solar y la fotovoltaica permitiría también aprovechar una banda ancha del espectro. En estos sistemas híbridos, la luz solar se concentra y se hace incidir sobre una superficie de wolframio, la cual se calienta hasta tornarse incandescente. Una célula fotovoltaica capta entonces la luz emitida por dicha superficie y la emplea para generar electricidad. Mediante una manipulación adecuada de la estructura de wolframio, puede ajustarse la frecuencia de la luz reemitida hasta acomodarla a aquella a la que opera la célula fotovoltaica.

La idea, que se conoce desde los años sesenta del pasado siglo, ya ha colocado en el mercado algunos módulos con estas características, pero su rendimiento resulta inferior al de las células fotovoltaicas tradicionales. Por un lado, esa disminución en la eficiencia sería de esperar, ya que el método necesita dar el «rodeo energético» que supone calentar primero la superficie de wolframio. Sin embargo, el rendimiento teórico se calcula en el 85 por ciento, ya que ese paso intermedio permite generar luz de la frecuencia correcta a partir de un gran número de fotones que, de otro modo, se perderían. Se cree que la in-


FRAUNHOFER ISE



Células de papel: Los investigadores de la Universidad Técnica de Chemnitz trabajan con tintas especiales que permiten imprimir células fotovoltaicas sobre papel corriente.

vestigación con nanomateriales ayudará a ajustar mejor la frecuencia de la luz emitida por la placa incandescente. Por otro lado, estos híbridos térmicos y fotovoltaicos podrían resultar útiles en las instalaciones donde se genera un exceso de energía térmica, como las centrales de combustibles fósiles y otras plantas industriales.

Otra técnica, a la que han contribuido investigadores de la Universidad Técnica de Chemnitz, se basa en la impresión de células fotovoltaicas en papel. El método emplea una tinta especial que transforma la luz solar en electricidad. Su ventaja reside en que tanto el papel como la impresión pueden obtenerse con materiales y procedimientos comunes. No obstante, el rendimiento de estas células se muestra aún muy bajo: un 1,3 por ciento, aunque se espera que pronto se incremente hasta el 5 por ciento. En tal caso, incluso células con una vida útil inferior a un año serían rentables, debido a lo económico de los materiales de producción.

Hace ya tiempo que la naturaleza perfeccionó otro principio: en cierto modo, las hojas de las plantas operan a modo de placas fotovoltaicas que transforman la luz solar en biomasa. Si a una célula de silicio se le incorpora un sistema de almacenamiento energético basado en la electrólisis para la combustión posterior del hidrógeno, la eficiencia del proceso asciende al 11 por ciento. La de las plantas, por su parte, resulta inferior al 1 por ciento.

Pero tanto plantas como células fotovoltaicas adolecen del mismo defecto: sin luz solar, no producen biomasa ni electricidad. Gran parte de la investigación actual se centra en el desarrollo de sistemas que permitan acumular durante la noche los excedentes de energía generados en las horas de luz. Sin embargo, los métodos de almacenamiento desarrollados hasta la fecha o bien no son eficientes (como la batería de flujo redox desarrollada por el Instituto Fraunhofer de Pfinztal, o los sistemas de aire comprimido en grutas subterráneas), o bien resultan polémicos desde el punto de vista ecológico (como las centrales de hidrobombeo, las cuales requieren la construcción de grandes embalses).

Mejores resultados promete el almacenamiento energético en centrales termosolares. En ellas, grandes espejos concentran la luz solar sobre un líquido, el cual se calienta y se emplea después para accionar una turbina de vapor. Estas plantas operan con grandes espejos parabólicos que concentran la luz sobre un tubo por el que fluye aceite, o bien con espejos planos que calientan un depósito de sal fundida situado en lo alto de una torre.

Si cuentan con un almacén de sal, ambos métodos pueden emplearse para suministrar electricidad durante la noche. La primera central termosolar dotada de este sistema de acopio energético fue Andasol 1, que comenzó a funcionar en Andalucía en 2008. Con unas dimensiones de 1300 por 1500 metros, la planta opera con colectores parabólicos que calientan aceite hasta una temperatura de 400 grados Celsius. Este se reconduce a un depósito de sal, la cual permite almacenar esa energía térmica durante siete horas. Por tanto, al igual que las térmicas o las nucleares, también estas centrales podrían emplearse para cubrir las necesidades de abastecimiento durante las caídas en la generación. En Europa, España y Alemania lideran la aplicación y desarrollo de esta técnica. Por su parte, también EE.UU. apuesta por una expansión de la energía solar. Hace poco comenzó en Blythe (California) la construcción de la que será la mayor de ellas, con una potencia nominal de 1000 MW, aunque su diseño no contempla ningún sistema de almacenamiento de sal.

La central de Blythe ocupará más de 27 kilómetros cuadrados. Esa cifra nos da una idea del problema que supondrían este tipo de instalaciones en países con una elevada densidad de población y escasa insolación. Por ello, no resulta extraño que muchos consideren que los desiertos del norte de África constituirían una localización ideal en la que levantar nuevas plantas. Además, dada su cercanía a Europa, resultaría viable importar esa energía en líneas de alta tensión. Tales son los fines del consorcio internacional Desertec. Según algunos cálculos, el 15 por ciento de la electricidad consumida en Europa en 2050 bien podría provenir del desierto.

Sin embargo, el proyecto ha sido criticado por el posible monopolio que las grandes compañías europeas podrían acabar ejerciendo sobre los países del norte de África, así como por el elevado gasto en agua necesaria para la refrigeración. A lo anterior hay que sumar, además, unos costes de unos 400.000 millones de euros de aquí a mediados de siglo. El último año y medio ha visto confirmarse otra de las críticas que en el pasado se habían lanzado contra Desertec: la inestabilidad política de los países de la región. Ya existen planes para trasladar el proyecto a Grecia y prestar así ayuda económica al país. Por otro lado, Desertec podría suponer una buena oportunidad para apoyar la reconstrucción en el norte de África y llevar a cabo infraestructuras de calado.

PARA SABER MÁS

Un proyecto solar. Ken Zweibel, James Mason y Vasilis Fthenakis en *Investigación y Ciencia*, n.º 378, págs. 22-31, marzo de 2008.

Strom aus der Wüste: Welche Chancen bietet das Desertec-Project? Dirigido por C. Hengstenberg. Fastbook Publishing, 2009.

Photovoltaik — Strom aus der Sonne: Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung. Cristoph Jehle. CF Müller, 2009.

BYSTRIK TRNOVEC. INSTITUTO DE INGENIERÍA DE MEDIOS Y TÉCNICAS DE IMPRESIÓN DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE CHEMNITZ

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
   Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
   Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
   Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
   Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
   Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
   Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
   El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
   Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
   Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
   La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

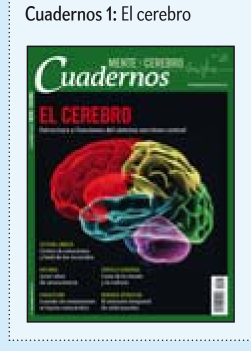
Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad

Cuadernos MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90€

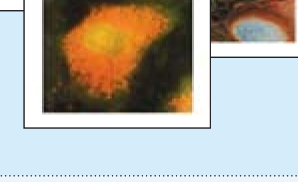
Cuadernos 1: El cerebro



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.


GURNEY



PALEONTOLOGÍA

Dinosaurios de un continente desaparecido

Hubo una época en que el oeste norteamericano fue habitado por distintas comunidades de dinosaurios. ¿Cómo lograron coexistir tal variedad de especies gigantes en un espacio tan reducido?

Scott D. Sampson

JAMES GURNEY

Scott D. Sampson es paleontólogo especializado en dinosaurios e investigador del Museo de Historia Natural de Utah. Desde el año 2000 ha dirigido proyectos destinados a recuperar fósiles del Cretácico superior en el Monumento Nacional de la Gran Escalera-Escalante, en Utah.



En una fría mañana de septiembre de 2010, iniciaba junto a mi equipo, un día más, el descenso desde nuestro campamento hacia un pasado remoto. Caminábamos en fila india a lo largo de una escarpada arista de arenisca y margas en el Monumento Nacional de la Gran Escalera-Escalante, al sur de Utah. Cada uno de nosotros transportaba agua, comida, un cuaderno de notas, un martillo de geólogo y otros instrumentos ligeros. Los materiales más pesados, como cortadoras de piedra, picos, escarpas, escayola y mantas de arpillera, nos aguardaban en el yacimiento, a casi un kilómetro de distancia. Desde la colina podíamos distinguir perfectamente los envoltorios de escayola que se encontraban abajo en la cantera. Su color blanco destacaba en el paisaje gris y árido del terreno abarrancado (*badlands*). Algunos de los bultos no eran más grandes que una hogaza de pan, otros medían tres metros de longitud y pesaban más de una tonelada. Pero todos contenían los fósiles de animales que vivieron aquí hace 76 millones de años.

En las dos campañas de excavación realizadas en esa cantera, una de las muchas que contienen fósiles de la formación geológica Kaiparowits, hemos recuperado restos de animales sorprendentes, entre los que figuran varios dinosaurios. El fósil más espectacular corresponde a un esqueleto casi completo de *Gryposaurus*, un dinosaurio herbívoro de «pico de pato», con un tamaño semejante al de *Tyrannosaurus*. El equipo deseaba terminar pronto la excavación, ya que en pocos días vendría un helicóptero para trasladar los preciados restos a una carretera cercana. Desde allí, los fósiles se transportarían en camión al Museo de Historia Natural de Utah, en Salt Lake City. En el museo se abrirían con cuidado los envoltorios, se extraerían los fósiles de las rocas y se pegarían entre sí para reconstruirlos, tarea que duraría varios meses.

Al detenerme en una cornisa de arenisca me sumergía en el paisaje e imaginaba por enésima vez ese lugar hace millones de años, cuando los dinosaurios lo recorrían. En esa época se extendía en la zona una inmensa llanura pantanosa. Ríos mansos procedentes de las montañas que había al oeste formaban meandros en un paisaje salpicado de embalses y lagos. Los cipreses crecían en las tierras más cenagosas, mientras que en otras zonas más drenadas se desarrollaban bosques de coníferas y árboles con flores. Las enredaderas colgaban de las ramas de los árboles y numerosos insectos llenaban el aire húmedo. La imagen podría recordar al ambiente pantanoso que hoy encontramos en el norte de Lousiana. Pero a este deberíamos añadir una docena de especies de dinosaurios, algunos de ellos herbívoros, como los hadrosaurios de «pico de pato» y los dinosaurios con

EN SÍNTESIS

Durante el Cretácico superior, hace entre 70 y 90 millones de años, un mar somero inundaba el centro de Norteamérica y dividía el continente en dos regiones, una oriental y otra occidental. A esta última se la denomina Laramidia.

En los años ochenta del siglo XX, un investigador propuso que diferentes comunidades de dinosaurios habrían habitado las regiones meridionales y septentrionales de Laramidia durante millones de años. Sin embargo, algunos críticos dudaban que tantos animales de grandes dimensiones hubieran vivido en un territorio tan reducido.

Los descubrimientos realizados en el último decenio en el sur de Utah han confirmado la idea de la coexistencia de distintas comunidades de dinosaurios en el norte y en el sur. Se han descrito, además, numerosas especies nuevas, entre las que figuran algunos dinosaurios gigantes.

No se sabe con exactitud cómo lograron vivir al mismo tiempo estos enormes animales en un espacio tan pequeño. Quizá tuvieran menos necesidades energéticas que los animales terrestres de hoy, o tal vez las plantas del Cretácico superior proporcionaran más alimento que la vegetación actual.





Trepando por las colinas: miembros del equipo del autor ascienden a lo largo de una cresta en las tierras áridas de Kaiparowits en el Monumento Nacional de la Gran Escalera-Escalante de Utah (*1*). Allí han descubierto los restos de nuevas especies de dinosaurios. Los fósiles, como este cráneo de *Kosmoceratops*, son transportados al Museo de Historia Natural de Utah, donde son restaurados y reconstruidos por voluntarios (*2*). Otra especie identificada en esta región es el dinosaurio con cuernos *Utahceratops* (*3*).

RICK WICKER, MUSEO DE NATURALEZA Y CIENCIA DE DENVER (*Formación Kaiparowits*); CORTESÍA DE MARK LOEWEN, MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE UTAH (*cráneos de dinosaurios*)

cuernos (ceratópsidos); y otros carnívoros, como los dromeosaurios con afiladas garras y un tipo de tiranosaurio gigante.

A lo largo de la última década, nuestras excavaciones en esa región remota han revelado datos fascinantes sobre las especies de dinosaurio que vivieron durante la edad Campaniense, hace entre 83,5 y 70,6 millones de años, en el Cretácico superior. Quizás en esa época los dinosaurios disfrutaron de su máximo esplendor. La asociación de fósiles de Kaiparowits podría parecer poco especial, ya que en ella se conservan los mismos grandes grupos de dinosaurios que los desenterrados en estratos de cronología similar mucho más al norte, en Montana y en Alberta. Sin embargo, las especies halladas en Kaiparowits resultan únicas, con numerosas formas de grandes dimensiones, lo que nos lleva a reflexionar sobre muchas de las ideas establecidas acerca de la evolución de los dinosaurios.

NORTE Y SUR

Durante el Cretácico superior, la Tierra gozaba de un clima cálido y húmedo. Las regiones polares del planeta no se hallaban cubiertas por masas de hielo y el nivel de mar era extraordina-

riamente elevado. Un mar cálido y salado, el mar Interior Occidental, inundaba la región central de Norteamérica; conectaba el océano Ártico con el golfo de México y dividía el continente en dos masas de tierra al este (Appalachia) y al oeste (Laramidia). Los dinosaurios, las plantas y otros organismos recuperados en Kaiparowits habitaron en Laramidia, un territorio con la quinta parte de la extensión de Norteamérica.

Desde los años sesenta del siglo xx, los buscadores de fósiles que trabajaban en el mar Interior Occidental empezaron a observar que los dinosaurios del Cretácico superior de Montana y Alberta pertenecían a especies distintas de las identificadas en rocas de cronología similar en yacimientos más al sur, en Nuevo México y Texas. En los años ochenta, Thomas Lehman, de la Universidad Tecnológica de Texas, compiló la localización geográfica de los dinosaurios y de otros vertebrados de Laramidia y halló pruebas de que durante el período Cretácico, concretamente durante la edad Campaniense, las asociaciones de animales del norte y del sur eran diferentes. Puesto que no había indicios de que existiera una barrera geográfica que aislase el norte del sur, Lehman propuso la hipótesis de que la latitud creaba un gradiente climático que producía diferentes comunidades de plantas y animales, entre ellos los distintos grupos de grandes dinosaurios. Se trataba de una idea atrevida. Algunos cuestionaron el hecho de que en un territorio tan reducido como Laramidia vivieran distintas comunidades de dinosaurios y de que coexistieran allí tantas especies de enormes dimensiones.

Los que criticaban la hipótesis de Lehman señalaban que estos localismos aparentes podrían ser el resultado de muestras separadas en el tiempo. Dado que el Cretácico superior se extendió a lo largo de millones de años, los paleontólogos que habían trabajado en yacimientos del mar Interior Occidental a distinta latitud tal vez hubieran documentado diferentes intervalos cronológicos. De modo que el muestreo sesgado a través del tiempo pudo haber generado una percepción falsa de distintas comunidades coetáneas en diferentes regiones, aunque en realidad solo habría vivido un tipo de dinosaurios a la vez. Los escépticos señalaban aún otra posibilidad: que la identificación de distintos grupos se debía a un sesgo geográfico en el muestreo. Hasta hace poco, la mayoría de los dinosaurios de Laramidia se habían descubierto en yacimientos del norte, principalmente en Alberta y Montana. Quizá, si se encontraban más yacimientos al sur, se comprobaría que en el antiguo subcontinente había medrado una única comunidad de animales. En el año 2000, cuando junto a mis colaboradores empezamos a trabajar en Utah, ese debate estaba abierto.

Los fósiles que hemos hallado en la Gran Escalera-Escalante han solucionado en gran medida la falta de registro de dinosaurios del sur de Laramidia y han reforzado la hipótesis de Lehman. La datación de los fósiles constituye un aspecto esencial para responder a la pregunta de si en una misma época vivieron en el norte y el sur distintas comunidades de dinosaurios. El geólogo de nuestro equipo Eric Roberts, de la Universidad James Cook, localizó capas de ceniza volcánica a lo largo de diferentes estratos de Kaiparowits, que han sido datadas mediante métodos radiométricos. Los resultados indican que esta zona tan rica en fósiles se formó hace entre 76,5 y 75,5 millones de años. Al comparar estas dataciones con las realizadas en otras formaciones geológicas de Laramidia descubrimos que la de Kaiparowits se solapaba en el tiempo con la de Dinosaur Park en Alberta. Por tanto, hoy disponemos de pruebas de que al menos dos conjuntos de dinosaurios habitaban el norte y el sur de forma simultánea.

El siguiente paso consistió en evaluar si los dinosaurios de ambas regiones eran diferentes. De los 15 tipos de dinosaurios que ha recuperado mi equipo en el intervalo de un millón de años en cuestión, solo una docena resultan lo bastante completos como para identificar la especie. Y de estos, solo una especie de hadrosaurio de «pico de pato», del género *Gryposaurus*, tal vez se halle presente en los yacimientos del norte. Nuestro ejemplar se asemeja a *G. notabilis*, descubierto en Alberta, aunque la identificación no es segura y estamos llevando a cabo estudios para determinar si se trata de una especie distinta.

Exceptuando esa única coincidencia, los datos restantes son reveladores. Todas las especies de dinosaurios identificadas en Kaiparowits son diferentes de las halladas en los yacimientos del norte. En Utah merodeaban el oviraptor *Hagryphus* y el trodóntido *Talos*, carnívoros de tamaño pequeño y medio, respectivamente, mientras que en Alberta esos dos grupos estaban representados por los géneros *Chirostenotes* y *Troodon*. De forma similar, el tiranosaurio gigante de cara corta, del género *Teratophoneus*, representó el dinosaurio de mayores dimensiones que habitó la región de Utah, mientras que otro tiranosaurio, *Gorgosaurus*, desempeñaba esa función en el norte. Los dinosaurios herbívoros de la formación Kaiparowits también pertenecían a especies distintas de las que medraban en el norte. Una de ellas fue *Parasaurolophus*, un extraño hadrosaurio con una cresta tubular en la parte superior de la cabeza. Con anterioridad se han descubierto otras tres especies de *Parasaurolophus*, una en Alberta y dos en Nuevo México, pero la especie de Utah parece ser distinta.

Esa pauta se repite entre los ceratópsidos. En tiempo reciente hemos identificado uno de ellos, *Utahceratops*, que poseía un cráneo alargado y adornado, de unos dos metros de longitud. Otro tipo de ceratópsido más pequeño, *Kosmoceratops*, presentaba la cabeza adornada con 15 pequeños cuernos, más que ninguna otra especie de dinosaurio. Mientras que *Utahceratops*, *Kosmoceratops* y una tercera especie de ceratópsido (todavía sin nombre) moraban en Utah, otras especies de dinosaurios con cuernos se alimentaban de plantas en el norte.

El descubrimiento de la asociación fósil de dinosaurios en la Gran Escalera-Escalante ha proporcionado la prueba más firme de la existencia de comunidades aisladas de dinosaurios en Laramidia. Aunque al norte y al sur hallamos los mismos grupos, su composición específica era distinta. Ninguna de las 50 especies de dinosaurios que hemos documentado en numerosas formaciones de la edad Campaniense coinciden en ambas regiones. Este hallazgo descarta la posibilidad de que las diferencias entre las asociaciones septentrionales y meridionales se deban a un sesgo de muestreo por causas geográficas o cronológicas. Debemos por tanto admitir que al menos dos comunidades de dinosaurios coexistieron en esa masa de tierra durante un millón de años al final del Campaniense.

TIERRA DE GIGANTES

El hecho de que muchos de los dinosaurios de esas dos comunidades de Laramidia sean de grandes dimensiones hace aún más indescifrable el enigma. Algunos estudios realizados con animales terrestres actuales señalan una relación entre el tamaño corporal y la superficie del territorio. Los animales de gran tamaño tienden a ocupar regiones más amplias porque también necesitan una mayor área para obtener su alimento. Por la misma razón, las especies que viven en territorios extensos suelen poseer una densidad de población inferior. Así, el tamaño máximo de los mamíferos terrestres refleja un equilibrio entre una

Diversidad de dinosaurios

Hace entre 70 y 90 millones de años, durante el Cretácico superior, un mar interior aisló la parte occidental de la actual Norteamérica y se formó una franja de tierra emergida, Laramidia. Las investigaciones hacían pensar que en el norte y en el sur de ese territorio vivían diferentes comunidades de dinosaurios y de otros animales. Pero algunos críticos planteaban que la pauta observada se debía tal vez a un sesgo temporal o geográfico en el muestreo. Los fósiles descubiertos en tiempo reciente en la formación Kaiparowits del Monumento Nacional de la Gran Escalera-Escalante han revelado una comunidad de especies de dinosaurios sin precedentes. Se trata de una comunidad coetánea pero distinta de otra que vivió más al norte, lo que apoya la hipótesis de dos provincias de dinosaurios en Laramidia, una septentrional y otra meridional. La naturaleza de la barrera que separó los dinosaurios del norte de los del sur sigue siendo un misterio. El mapa de abajo señala algunos de los dinosaurios con cuernos (representados por sus cráneos) de las asociaciones de ambas regiones.



ILUSTRACIÓN DE GEORGE RETSECK; ADAPTACIÓN DE RON BLAKEY, UNIVERSIDAD DEL NORTE DE ARIZONA

densidad de población lo bastante baja como para evitar la sobrexplotación de recursos y lo bastante alta como para no extinguirse. En última instancia, los valores máximos de tamaño corporal y diversidad específica en los megavertebrados se hallan limitados por una combinación de características fisiológicas (tasas metabólicas altas requieren mayor ingestión de recursos), disponibilidad de alimentos y amplitud del territorio. Los territorios más extensos pueden sostener más especies de grandes dimensiones. Esa relación resulta más restrictiva en los grandes carnívoros, que deben ocupar territorios mucho más amplios que los herbívoros porque solo una pequeña parte de la energía total del ecosistema alcanza la cúspide de la pirámide trófica.

En teoría, los dinosaurios gigantes deberían haber seguido las mismas reglas que hallamos en los grandes mamíferos terrestres de la actualidad, lo que hubiera llevado a un escaso número de especies en la reducida superficie de Laramidia. Pero las comunidades de animales de las formaciones Kaipa-



Instinto depredador: ***Teratophomeus*****, un tipo de tiranosaurio, abate un hadrosaurio de «pico de pato» del género** ***Gryposaurus*****. En el Monumento Nacional de la Gran Escalera-Escalante se han hallado fósiles de ambos tipos de dinosaurios que datan de hace 76 millones de años.**

rowits y de Dinosaur Park albergan al menos entre 17 y 20 especies coetáneas de dinosaurios gigantes, esto es, con un peso del animal adulto superior a una tonelada (aunque la mayoría pesaba más de dos). Según los estándares actuales, tal situación resulta muy extraña. Hoy el único lugar del planeta en el que se hallan abundantes animales enormes es África, donde viven seis mamíferos, todos ellos herbívoros, con un peso corporal superior a una tonelada: la jirafa, el hipopótamo (que pasa más tiempo dentro del agua que en la tierra), dos especies de elefante y dos de rinoceronte.

Bien es cierto que, en el pasado, el continente africano y otras regiones albergaron un mayor número de especies terrestres de grandes dimensiones. Por ejemplo, durante el Pleistoceno inferior, hace entre 2,5 y 2 millones de años, en África vivieron alrededor de 16 grandes mamíferos herbívoros: diversas variedades de jirafas, elefantes, hipopótamos y rinocerontes, además de antílopes que pesaban más de una tonelada. Sin embargo, los datos indican que los dinosaurios de Laramidia constituyen un caso excepcional.

En primer lugar, la superficie de Laramidia representaba menos de la quinta parte del África del Pleistoceno, así que los 17 o 20 dinosaurios gigantes se hallaban confinados en un territorio mucho más reducido que el de esos mamíferos. Además, las abundantes pruebas de muertes en masa, con acumulaciones de huesos y grandes lechos de fósiles, indican que muchas de las especies de hadrosaurios formaban en algún momento del año grandes manadas, con cientos o quizá miles de individuos. En segundo lugar, en los ecosistemas dominados por mamíferos del Pleistoceno muy pocos carnívoros alcanzaban una tonelada de peso. De hecho, durante la evolución de los mamíferos terrestres ningún carnívoro se ha acercado al tamaño de un tiranosau-



rio. El mayor depredador de África es el león, que suele pesar menos de 300 kilogramos. En cambio, en Laramidia había al menos tres tiranosaurios gigantes de más de una tonelada. En tercer lugar, los paleontólogos han descubierto fósiles del Pleistoceno inferior en numerosos yacimientos de distintos países africanos, mientras que las muestras de Laramidia se limitan a dos formaciones geológicas coetáneas. Dado que los dinosaurios de Laramidia parecían extenderse en un territorio menor del que ocupan hoy los mamíferos terrestres, y puesto que las comunidades de dinosaurios apenas se solapaban entre sí, es muy probable que otros tipos de dinosaurios habitaran este subcontinente durante el Campaniense. Si así fue, el número de dinosaurios gigantes que coexistieron en Laramidia pudo haber excedido las 20 especies. En definitiva, los fósiles de Kaiparowits sugieren que los dinosaurios de grandes dimensiones superaban los límites de diversidad observados en los mamíferos.

¿DINOSAURIOS CONSERVADORES O PLANTAS PRODUCTIVAS?

Esa comparación entre los grandes mamíferos de África y los dinosaurios gigantes de Laramidia nos lleva de nuevo a la cuestión clave suscitada por la hipótesis de Lehman. ¿Cómo pudieron sobrevivir tantos dinosaurios gigantes en un territorio tan pequeño? Caben dos posibilidades: o bien necesitaban menos alimento que los otros animales gigantes, o vivían en ecosistemas que proporcionaban más alimento del que podemos observar en ambientes actuales.

Durante largo tiempo se ha debatido si el metabolismo de los dinosaurios se asemejaba al de los animales de sangre fría, o exotermos (anfibios y reptiles), o al de los de sangre caliente, o endodermos (aves y mamíferos). Si su tasa metabólica resultaba intermedia entre la de esos dos grupos, tal vez presentaran menos requisitos energéticos que los grandes mamíferos. Esa diferencia explicaría la coexistencia de un número tan elevado de especies enormes en el reducido espacio de Laramidia. En una investigación reciente, Brian K. McNab, de la Universidad de Florida, sostiene que los dinosaurios no tenían ni sangre fría ni caliente, sino intermedia. McNab ha hallado indicios de que el menor gasto energético de los dinosaurios permitiría al ecosistema soportar comunidades de una biomasa cinco veces superior a las de los mamíferos herbívoros que hoy vemos en África.

Otra posibilidad sería que las plantas del Cretácico superior ofrecieran a los megaherbívoros un alimento más abundante o más nutritivo, en comparación con los ecosistemas terrestres actuales. La diversidad y abundancia de las plantas dependen de factores como la precipitación, la temperatura, la duración de la estación de crecimiento y la disponibilidad de nichos ecológicos. Hoy en día, los ecosistemas con mayor número de especies y biomasa vegetal se sitúan en los trópicos pero, durante el período cálido del Cretácico superior, las altas temperaturas pudieron limitar la diversidad de plantas y animales en esas regiones. En cambio, en latitudes medias como las que ocupaba Laramidia, el clima era suave y la estación de crecimiento larga. Al oeste, las cordilleras y los ríos multiplicaban los nichos ecológicos disponibles. Al este, el mar Interior Occidental templaba las temperaturas y proporcionaba abundantes precipitaciones. Los paleobotánicos Ian Miller y Kirk Johnson, del Museo de Naturaleza y Ciencia de Denver, han recuperado en los estratos de Kaiparowits los restos de al menos 100 tipos de plantas. Aunque hace falta investigar mucho más, todos los indicios apuntan a que la comunidad de dinosaurios de Laramidia se hallaba rodeada de una gran cantidad y variedad de plantas.

Se necesitan más datos para saber lo que permitió a los dinosaurios alcanzar tan colosales dimensiones y aumentar su diversidad. ¿Se debió ello a una menor tasa metabólica de los animales o a la mayor disponibilidad de recursos en el entorno? Mi presentimiento es que ambos factores influyeron. Podemos afirmar con seguridad que el mundo cálido que habitaron los dinosaurios no se asemejaba al de hoy. Muchos de los biomas que se extienden por el frío planeta actual, como las praderas, la tundra y los bosques lluviosos, no existían durante el reinado de los dinosaurios, y ni siquiera contamos con una idea básica acerca de las grandes comunidades vegetales primitivas. De hecho, todavía nos queda un largo camino para conocer cómo era ese mundo tan cálido. Afortunadamente, los estudios paleontológicos cada vez son más interdisciplinares, con la participación de geólogos, paleoecólogos, paleoclimatólogos y otros, por lo que aumentan las posibilidades de que surjan ideas fructíferas.

Mientras tanto, como sucede en toda investigación científica, nuestro trabajo en la formación Kaiparowits nos proporciona tantas preguntas como respuestas. ¿Cuántas comunidades de dinosaurios habitaron a la vez en el antiguo continente de Laramidia? ¿Qué tipo de barrera separaba las comunidades del norte y del sur? ¿Se trataba simplemente de una barrera climática, como inicialmente se propuso? ¿O había algún tipo de obstáculo físico, como indican algunos geólogos, tal vez una serie de ríos que fluían desde las montañas hacia el mar al norte de Utah y Colorado?

Merece la pena hacer aún una última y fascinante reflexión. Si las especies de dinosaurios se extendían por territorios más reducidos que los que ocupan los mamíferos actuales de tamaño equivalente, habría existido en todo el mundo una riqueza y diversidad de dinosaurios mucho mayor de lo que habíamos imaginado. Lo que significa que todavía se hallan enterrados un sinfín de maravillosos dinosaurios que esperan con paciencia ser descubiertos.

PARA SABER MÁS

Dinosaurs, dragons, and dwarfs: The evolution of maximal body size. Gary P. Burness, Jared Diamond y Timothy Flannery en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 98, n.º 25, págs. 14.518-14.523, 4 de diciembre de 2001.

Resources and energetics determined dinosaur maximal size. Bruce K. McNab en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, n.º 29, págs. 12.184-12.188, 21 julio de 2009.

Dinosaur odyssey: Fossil threads in the web of life. Scott D. Sampson. University of California Press, 2009.

New horned dinosaurs from Utah provide evidence for intracontinental dinosaur endemism. Scott D. Sampson et al. en *PLoS ONE*, vol. 5, n.º 9, 22 de septiembre de 2010.

A golpe de palo de hockey

Michael E. Mann comenzó buscando un desafío científico y terminó sumido en una vorágine política en torno al cambio climático. Ahora relata su versión de la historia

David Biello

El climatólogo Michael E. Mann es más conocido por lo que él considera uno de los aspectos «menos interesantes» de su carrera. En la década de los noventa del siglo pasado utilizó los anillos de crecimiento de los árboles, las bandas de crecimiento coralino y los testigos de hielo como indicadores climáticos (variables *proxy*) para deducir temperaturas pasadas y combinó sus datos con las lecturas actuales de los termómetros. El registro anual de las variaciones de temperatura a lo largo de los últimos milenios permitió ampliar nuestro conocimiento sobre los ciclos climáticos naturales. En un artículo publicado en 1998 se le ocurrió incluir, como idea de última hora, un gráfico de la temperatura media en el hemisferio norte desde el siglo XV (que posteriormente amplió hasta el año 1000 d.C.). El gráfico del «palo de hockey», que muestra el modo en que han oscilado las temperaturas a lo largo del tiempo hasta dispararse en fecha más reciente, se convirtió en un emblema del cambio climático.

Pero también supuso una fuente de controversia. A pesar de que el Comité Nacional de Investigación de EE.UU. revisó el «palo de hockey» y aprobó sus conclusiones en 2006, en repetidas ocasiones Mann y sus investigaciones fueron víctima de un hostil escrutinio público que culminó en el caso *Climategate*: el robo y la publicación de la comunicación mantenida por correo electrónico entre Mann y sus colaboradores en 2009. A raíz de ello, la Universidad estatal de Pennsylvania, donde Mann trabajaba, lo investigó por falta de ética profesional (y lo absolvió en 2010). El fiscal general de Virginia, Ken Cuccinelli, demandó a la universidad de este estado, donde Mann había trabajado con anterioridad, y exigió que se investigue el trabajo que realizó allí. Finalmente, el Tribunal Superior de Virginia desestimó el pasado 2 de marzo la demanda de Cuccinelli. Con todo, Mann sostiene que sus detractores «no descansan».

Mann asesta ahora un nuevo golpe mediante la publicación de su propia versión de lo ocurrido en el libro *The hockey stick*

EN SÍNTESIS

Michael E. Mann estudia el cambio climático en la Universidad estatal de Pensilvania. Centra su investigación en la mejora de los modelos actuales y en la comunicación de cuestiones climáticas.

Autor del famoso gráfico del «palo de hockey», que muestra el reciente aumento de las temperaturas mundiales, fue víctima de una persecución mediática por parte de los escépticos del cambio climático.

En esta entrevista, Mann habla sobre la controversia suscitada a raíz de la publicación de ese gráfico y ofrece su propia versión de los hechos.

CHRIS CRISMAN (*fotografías*)


$C = C_0 [1 + \alpha (T - T')$

and the climate wars. Hemos entrevistado a Mann y hablado con él acerca de su labor investigadora, la controversia y sus esperanzas de evitar un cambio climático catastrófico. A continuación reproducimos un extracto de dicha entrevista.

¿Qué le llevó a dedicarse a la climatología?
Después de licenciarme en matemática aplicada y física, realicé estudios de posgrado en física teórica. Cuando me di cuenta de que las opciones eran bastante limitadas, comencé a pensar dónde podía aplicar la física y las matemáticas que había aprendido con el fin de investigar algún problema científico de gran envergadura, uno con implicaciones en el mundo real. Abrí el catálogo de ciencias aplicadas de la Universidad de Yale y encontré una sección que describía el trabajo que realizaba el departamento de geología y geofísica sobre el desarrollo de modelos teóricos del sistema climático. Me pareció fascinante.

En aquel entonces, existía un debate científico legítimo en torno a la realidad de un cambio climático antropogénico que ya se había observado. En realidad, mi trabajo guardaba poca relación con aquel debate.

Usted comenzó analizando las variaciones naturales de la temperatura, ¿no es cierto?
Resulta irónico. Parte de mis primeros trabajos fueron elogiados por los contrarios a la idea del cambio climático (acuñé el término «oscilación multidecadal atlántica» [AMO, por sus siglas en inglés]). Les encanta defender que esa oscilación es la responsable de prácticamente todo cuando, de hecho, la realidad depende de una gran variedad de factores. Efectivamente, la oscilación parece existir, pero no explica por sí misma el cambio climático.

La AMO podría considerarse una prima lejana de El Niño. Se trata de una oscilación en el sistema climático con ciclos de varias décadas. Fue precisamente este fenómeno el que suscitó mi interés por los datos que proporcionan los indicadores climáticos (como los anillos de crecimiento de los árboles), ya que tratar de demostrar la existencia de una oscilación con ciclos de 50 a 70 años a partir de las observaciones instrumentales de los últimos 100 a 150 años supone un problema evidente.

Los datos de los indicadores climáticos constituyen archivos naturales que, de manera intrínseca, registran ciertas características del clima. Por ejemplo, el grosor de los anillos de los árboles depende de la temperatura en la estación de crecimiento y, en determinadas circunstancias, de la humedad. Por tanto, a partir de estos anillos puede extraerse información climática.

Al combinar datos procedentes de diferentes indicadores comienza a obtenerse una visión más global de lo que sucede y se evita el riesgo de confiar en un solo tipo de indicador. Cada uno presenta sus propios puntos fuertes y débiles.

El resultado más famoso de aquel trabajo es, sin duda, el gráfico del palo de hockey. ¿Cómo surgió aquella idea?
Estamos hablando de termómetros imperfectos que nos ofrece la naturaleza. Probablemente, el mayor reto residía en relacionar esos datos con mucho ruido de fondo con el registro actual de la temperatura superficial, de tal modo que pudieran estimarse las temperaturas pasadas de la superficie terrestre. Tan solo la observación de las temperaturas en todo el planeta permite comprender mejor, por ejemplo, la historia de El Niño.

Lo menos interesante que podía hacerse una vez obtenida la distribución espacial de los datos era promediarlos y obtener un solo valor anual, la temperatura media del hemisferio norte, y representarlos frente al tiempo. El resultado fue la curva del palo de hockey.

Las temperaturas pasadas más remotas descendían suavemente desde el Período Cálido Medieval, un período con estaciones relativamente suaves que tuvo lugar hace unos 1000 años, hasta alcanzar el mínimo en la Pequeña Edad de Hielo de los siglos XVII, XVIII y comienzos del XIX. Todo ello correspondería, por así decirlo, al mango del palo de hockey. Al final del gráfico, el ascenso brusco definiría la pala: el calentamiento de los últimos 150 años, con temperaturas por encima de cualquiera de las reconstruidas durante todo el período analizado. Aquel simple resultado acaparó toda la atención.

¿Quién fue el primero en llamarlo «palo de hockey»?
Fue Jerry Mahlman, que dirigía el Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU. (NOAA), en Princeton, Nueva Jersey. En realidad, el término ya se había utilizado con anterioridad en el contexto de la disminución del ozono. Había una cierta costumbre de aplicarlo a la descripción de series de datos que culminaban en un gran pico repentino.

¿Se arrepiente del nombre?
Siempre se corre el riesgo de que la aplicación de un término simple a un fenómeno complejo termine en una caricatura de la ciencia. En la actualidad, hay una auténtica liga de hockey de reconstrucciones similares a la nuestra que muestran la misma tendencia.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) destacó el palo de hockey en su informe de 2001. ¿Fue una decisión acertada?
En retrospectiva, quizá no fuera la decisión más prudente porque reforzaba el argumento que suelen esgrimir los escépticos del cambio climático: que, de alguna manera, la ciencia depende de un resultado concreto o incluso de un autor y un estudio en particular. Y si se consigue desacreditar ese estudio o autor, el movimiento científico al completo se derrumba.

De hecho, el informe técnico ya incluía varias reconstrucciones que mostraban resultados similares. Cuando se publicó el informe del IPCC, existían otras tres reconstrucciones que llegaban más o menos a las mismas conclusiones.

¿Qué opina de que se le haya considerado el cabeza de turco de la climatología?
En ocasiones me decía: «Venga, adelante». Confío en la robustez de nuestro trabajo científico. Si los escépticos del cambio climático pensaron que habían dado con una disciplina científica a la que poder desacreditar persiguiendo a un solo científico —yo—, creo que van a llevarse una decepción.

Entre los correos electrónicos robados en 2009 había algunos suyos, aunque no eran los más controvertidos. ¿Cómo ocurrió todo?
A los que robaron y publicaron esos correos, ¿les gustaría que alguien abriera sus diarios, sus comunicaciones privadas, y las expusieran públicamente fuera de contexto? El hecho de que los escépticos del cambio climático necesitaran recurrir a actos delictivos con el fin de desacreditar nuestro trabajo me indignó. Me irritó. E irritó, creo, a mu-



Indicadores climáticos: Archivos naturales como los anillos de crecimiento de los árboles facilitan información sobre climas pasados.

chos otros miembros de la comunidad científica.

Se trataba de una campaña deliberada para construir con los correos robados un altavoz de la propaganda de ese grupo poco antes de la cumbre de Copenhague. Se intentó hacer uso de tergiversaciones, alegaciones falsas y difamaciones basadas en aquellos correos descontextualizados como excusa para despedir a científicos.

Llegó un momento en que un influyente legislador republicano del estado de Pensilvania amenazó con retener la financiación de la universidad estatal si esta no tomaba medidas en mi contra por mis supuestas indecencias. Así de mal se pusieron las cosas.

Hemos perdido tres años para actuar ante el cambio climático, lo que supone dejar pasar una oportunidad muy valiosa. Cada año que pasa, resulta más difícil mantener las concentraciones de dióxido de carbono por debajo de niveles que podrían muy bien ser peligrosos. Desde mi punto de vista, [el *Climategate*] fue un crimen contra la humanidad. Un crimen contra el planeta.

¿Cuál es su reacción ante las alegaciones de que había un «engaño para ocultar el descenso»?

En relación a esa afirmación hay al menos cinco mentiras, pero la más obvia es que no se hizo nunca referencia a un «engaño para ocultar el descenso». Lo que se hizo fue copiar dos partes diferentes de un correo electrónico y combinarlas de modo que cambiara radicalmente el sentido de lo que en realidad se estaba discutiendo.

Lo irónico de la alegación de que [los climatólogos] trataban de ocultar el descenso de las temperaturas globales es que aquel mensaje se había escrito a comienzos de 1999, justo un año después del que había sido el más cálido hasta la fecha, 1998. Así que difícilmente un científico que escribiera un correo en aquel entonces podría suponer que se estaba produciendo un descenso de las temperaturas. En todo caso, lo que estaba teniendo lugar era una aparente aceleración del calentamiento. El «descenso» se refería simplemente a unos datos erróneos de anillos de crecimiento de los árboles.

¿En qué se asemejan la negación del cambio climático y otras cruzadas anticientíficas pasadas?

Es inconcebible que en el siglo xxi todavía se deba hacer frente al rechazo a la ciencia cuando gran parte de la vida moderna se basa en la infraestructura tecnológica que se ha desarrollado gracias a ella. Las personas que precisamente denuncian las actividades científicas en diferentes disciplinas se benefician de las contribuciones de la ciencia moderna.

¿Qué efecto ha tenido sobre los científicos?

Probablemente haya animado a otros expertos a combatir la desinformación tanto en nuestro campo como en muchos otros. Los científicos ya no pueden permanecer aislados en sus laboratorios y confiar en que las conclusiones de su trabajo se difundan de manera honesta y productiva en el discurso público. Necesitan ser proactivos y asegurarse de que su ciencia se comunica de la manera más fidedigna posible.

¿Algún comentario respecto al pleito contra usted y la Universidad de Virginia?

Es muy triste que ciertas personas con posturas anticientíficas, que miran a la ciencia con desdén, ocupen los cargos más altos del gobierno estadounidense. Da mucho miedo.

¿Qué función desempeña la política en la ciencia?

Me parece legítimo que la ciencia exponga su punto de vista en cuestiones políticas. Lo que no me parece correcto es que una postura política influya en la labor de un científico.

Hace unos años el cambio climático no suponía ningún debate político. Mi colaborador [el glaciólogo de la Universidad estatal de Ohio] Lonnie Thompson lo expresa claramente en su explicación sobre la desaparición de los glaciares de montaña. El hielo es imparcial. Da igual que uno sea republicano o demócrata. El hielo retrocede. El nivel del mar se eleva. Son fenómenos que no responden a causas políticas. Lo que hagamos al respecto sí será, evidentemente, una cuestión política.

¿Cree que las consecuencias del cambio climático se están manifestando a mayor velocidad de lo pronosticado?

Los cambios se han ido produciendo más rápidamente de lo que predecían los modelos. Las variaciones en la elevación del nivel del mar, las temperaturas, las emisiones de carbono y otros fenómenos se han producido en el límite superior de las predicciones o incluso por encima del rango pronosticado.

El océano Ártico constituye probablemente el ejemplo más claro. La disminución del hielo durante el verano ártico se encuentra fuera del rango calculado por las predicciones. Lo más irónico es que los climatólogos, en todo caso, han sido demasiado cautos o prudentes.

Usted afirma conservar la esperanza. ¿Por qué?

Si analizamos la historia, al final la ciencia y la honestidad terminan venciendo, tal vez más tarde de lo que hubiera sido deseable.

En el caso del tabaco, actuamos más tarde de lo debido. Respecto a la disminución del ozono y la prohibición de los clorofluorocarbonos, también actuamos tarde. Seguramente sufrimos más daños y pérdidas humanas debido al retraso de nuestras acciones. Pero tomamos medidas.

David Biello *es redactor de* Scientific American.

PARA SABER MÁS

Surface temperature reconstructions for the last 2000 years. National Research Council. National Academies Press, 2006. **www.nap.edu/catalog/11676.html**

Dire predictions: Understanding global warming. Michael E. Mann y Lee R. Kump. Prentice Hall, 2008.

The hockey stick and the climate wars: Dispatches from the front lines. Michael E. Mann. Columbia University Press, 2012.

Elena Ormeño es doctora en ecología química e investigadora del Instituto Mediterráneo de Biodiversidad y Ecología (IMBE) del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) en Marsella. Se dedica al estudio de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación y sus consecuencias ambientales.



Catherine Fernández es catedrática de ecología en el IMBE. Centra sus estudios en el metabolismo secundario como variable que determina la biodiversidad, la abundancia y el crecimiento de las plantas en el ecosistema.

ECOLOGÍA

Los terpenos de las plantas

La producción vegetal de estos compuestos volátiles tiene importantes repercusiones en el ecosistema forestal y la atmósfera

Elena Ormeño y Catherine Fernández

Las alteraciones que se producen en el ambiente, ya sean naturales o de origen humano, no pasan desapercibidas para las plantas, que disponen de mecanismos de defensa que les permiten sobrevivir a los cambios. Uno de estos mecanismos consiste en la acumulación y emisión de ciertas sustancias volátiles, los terpenos. Igual que las espinas urticantes, que defienden a las plantas frente a la agresión de los herbívoros, los terpenos ejercen también numerosas funciones protectoras.

La mayoría de las plantas vasculares (aquellas con raíz, tallo, hojas y vasos de conducción de la savia), bien se trate de especies leñosas o de herbáceas, sintetizan estas moléculas volátiles. Se trata de compuestos de muy bajo peso molecular, con un olor más o menos intenso para el olfato humano, que los vegetales producen de forma regular o únicamente bajo condiciones de estrés.

Las plantas emiten cantidades elevadas de terpenos al aumentar la luz y la temperatura, así como en situaciones de contaminación atmosférica y de sequía moderada. En la región mediterránea, la incidencia de la luz solar resulta notable durante la mayor parte del año; además, en esta zona los veranos son cada vez más calurosos, las sequías más pronunciadas y frecuentes, y las concentraciones de ozono de la baja atmósfera (troposfera) sobrepasan decenas de veces al año los límites tolerados por la legislación europea. Los terpenos constituyen por tanto un sistema defensivo crucial para la supervivencia de las especies vegetales en la región mediterránea. Pero si por un lado los terpenos ofrecen protección a las plantas, se ha comprobado que en contrapartida acarrean consecuencias negativas para la calidad del aire o el riesgo de incendio.

Las investigaciones llevadas a cabo por nuestro grupo en el Instituto Mediterráneo de Biodiversidad y Ecología (IMBE), en Marsella, se centran en el estudio de estas moléculas en especies mediterráneas con el fin de descifrar su significado ecológico y su sensibilidad a las condiciones ambientales. En concreto, intentamos responder a las siguientes preguntas: ¿Por qué las plantas acumulan y liberan terpenos? ¿Cómo influyen los terpenos liberados sobre el desarrollo y la biodiversidad de las poblaciones vegetales? ¿En qué modo contribuyen a la contaminación atmosférica y al riesgo de incendio?

EN SÍNTESIS

La mayoría de las plantas sintetizan y liberan terpenos, unos compuestos orgánicos volátiles que desempeñan diversas funciones ecológicas y que tienen importantes repercusiones ambientales.

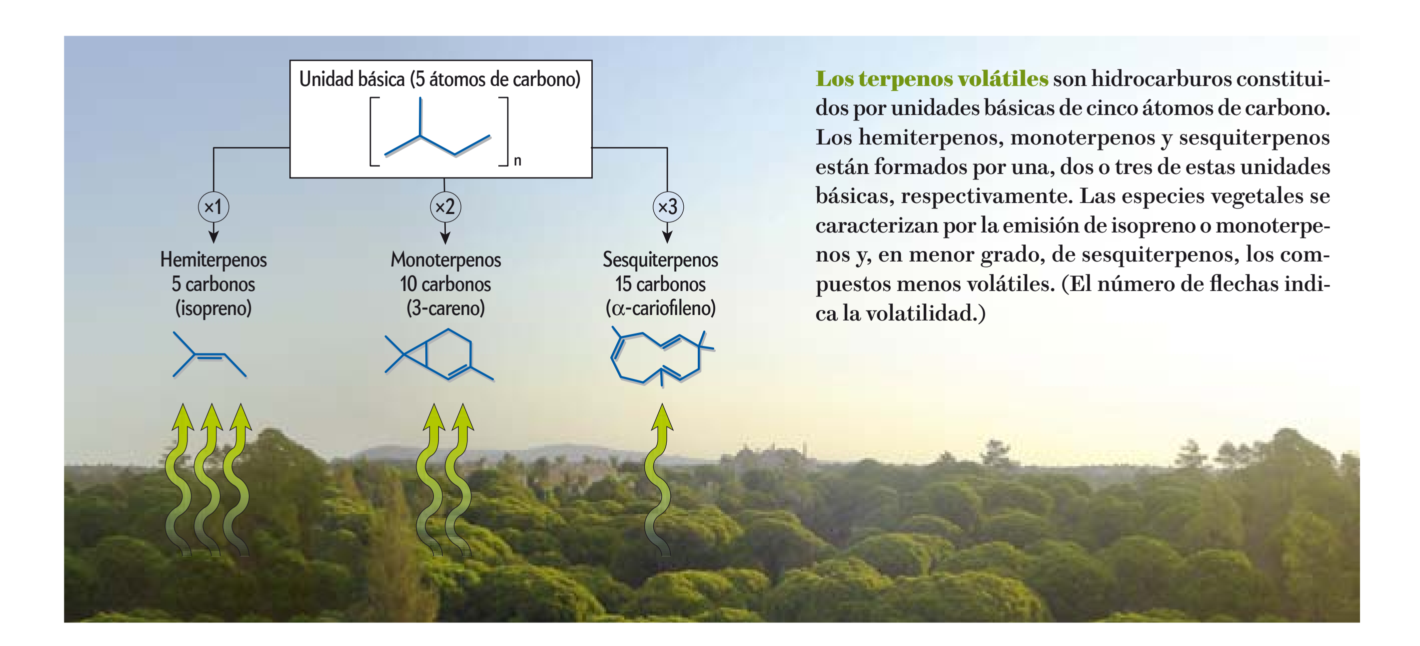
Se sabe que los terpenos confieren protección a las plantas al evitar la depredación por los herbívoros y contrarrestar las condiciones oxidantes de las sequías o la contaminación. Al mismo tiempo, acarrean consecuencias negativas en la calidad del aire o el riesgo de incendio.

A medida que avanzan las investigaciones, se va descubriendo la complejidad de las funciones de estas sustancias y de las condiciones ecológicas que favorecen su emisión por las plantas.

ELENA ORMEÑO



Los árboles y arbustos de los matorrales mediterráneos emiten terpenos, compuestos volátiles que pasan a formar parte de los gases atmosféricos. En la imagen, un bosque de Ospedale (Córcega).



Los terpenos volátiles son hidrocarburos constituidos por unidades básicas de cinco átomos de carbono. Los hemiterpenos, monoterpenos y sesquiterpenos están formados por una, dos o tres de estas unidades básicas, respectivamente. Las especies vegetales se caracterizan por la emisión de isopreno o monoterpenos y, en menor grado, de sesquiterpenos, los compuestos menos volátiles. (El número de flechas indica la volatilidad.)

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LAS AUTORAS

DEFINICIÓN Y LOCALIZACIÓN

Los terpenos son hidrocarburos que pertenecen a las familias de los alquenos, alcoholes, ésteres, éteres, aldehídos y cetonas. Cuando las moléculas contienen átomos de oxígeno se da preferencia al término terpenoide, aunque ambas denominaciones, terpeno y terpenoide, suelen utilizarse indistintamente. También se emplea el término isoprenoide, por tratarse de derivados del precursor inmediato del isopreno, el isopentenil difosfato, una molécula con cinco átomos de carbono. Por la unión sucesiva de dos, tres, cuatro y ocho unidades de isopreno, se generan, respectivamente, monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos y tetraterpenos, con diez, quince, veinte y cuarenta átomos de carbono y una volatilidad decreciente. Aunque estos compuestos presentan una biosíntesis y una estructura común, no desempeñan las mismas funciones, como se explicará más adelante.

En las plantas, los terpenos se localizan sobre todo en las hojas, las flores y los frutos y, en menor medida, en los tallos, el tronco y las raíces. Por ejemplo, la resina del tronco de los pinos contiene cantidades muy elevadas de terpenos.

Estos compuestos forman parte de las emisiones volátiles de la planta. Pero también pueden acumularse en su interior. En este caso, la especie presenta estructuras de almacenamiento, como los tricomas glandulares en el romero, los canales resiníferos en los pinos o las cavidades secretoras en los eucaliptos. Es importante aclarar que algunas especies, como la coscoja y la encina, carecen de estructuras secretoras donde se acumulan los terpenos antes de ser liberados a la atmósfera. Pero ello no les impide emitir una enorme cantidad de tales sustancias. En este tipo de plantas, los terpenos se hallan exclusivamente en sus emisiones volátiles, no en el interior de las hojas, aunque pueden detectarse valores muy bajos de los mismos en estructuras no específicas como los espacios intercelulares de los tejidos vegetales.

ASPECTOS HISTÓRICOS

Las propiedades odorantes y medicinales de los terpenos explican el hecho de que las plantas hayan sido utilizadas desde la antigüedad como materia prima para la obtención de perfumes, medicamentos o recetas culinarias [*véase* «La fragancia de las plantas», por Eran Pichersky; Investigación y Ciencia, junio de 2007].

Los terpenos fueron separados e identificados por Otto Wallach, premio Nobel de química orgánica en 1910. En la actualidad, gracias al desarrollo y perfeccionamiento de técnicas analíticas cromatográficas, se han detectado unos 15.000 compuestos terpénicos. Numerosos científicos, al verse confrontados con esta enorme diversidad sin un significado aparente o difícil de interpretar, han calificado la investigación de los terpenos como de auténtica pesadilla.

Desde mediados del siglo xix y hasta bien entrado el siglo xx se afirmaba que estas moléculas constituían tan solo metabolitos secundarios de la planta, es decir, desechos del metabolismo primario. Se entiende este como los procesos relacionados directamente con el crecimiento, la reproducción y, por tanto, la supervivencia de la planta. Entre ellos se incluyen la fotosíntesis, la respiración, el transporte de solutos, la diferenciación de los tejidos y la síntesis de proteínas, lípidos y carbohidratos. Por oposición, el metabolismo secundario se consideraba como el conjunto de reacciones no absolutamente necesarias para el desarrollo de la planta.

Habría que esperar hasta mediados del siglo xx para que la antigua definición de metabolitos secundarios empezara a quedar obsoleta gracias al trabajo de botánicos, biólogos, farmacéuticos, químicos y ecólogos. En esas investigaciones se puso de manifiesto que no se trataba de desechos sin utilidad alguna, sino que presentaban numerosas funciones en la planta que los producía y también en los organismos (plantas y animales) que los recibían. El conocimiento de las funciones de los terpenos ha exigido llevar a cabo estudios multidisciplinares que han aproximado a científicos de especialidades diversas.

Algunos científicos, como Guy Ourisson, químico que desarrolló gran parte de su labor en la Universidad de Estrasburgo, sostuvieron que la gran diversidad de los terpenos se debía a sus numerosas funciones. Para otros autores, como Clive G. Jones, del Instituto Cary de Estudios del Ecosistema en Nueva York, solo una minoría de estos compuestos serían funcionales y reforzarían los mecanismos de defensa de la planta. Los vegetales sintetizarían una gran diversidad de compuestos terpéni-

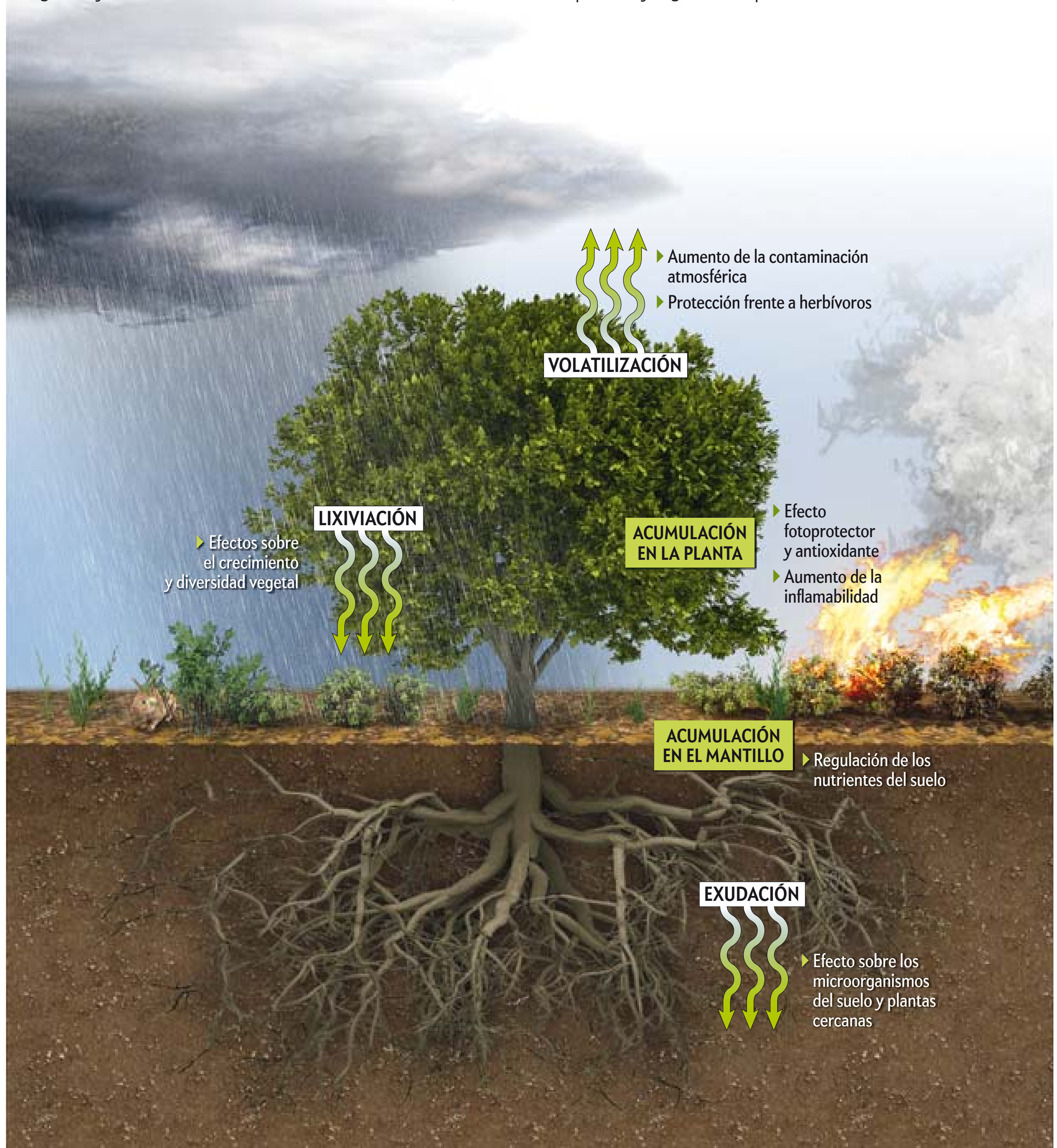
Beneficiosos y dañinos a la vez

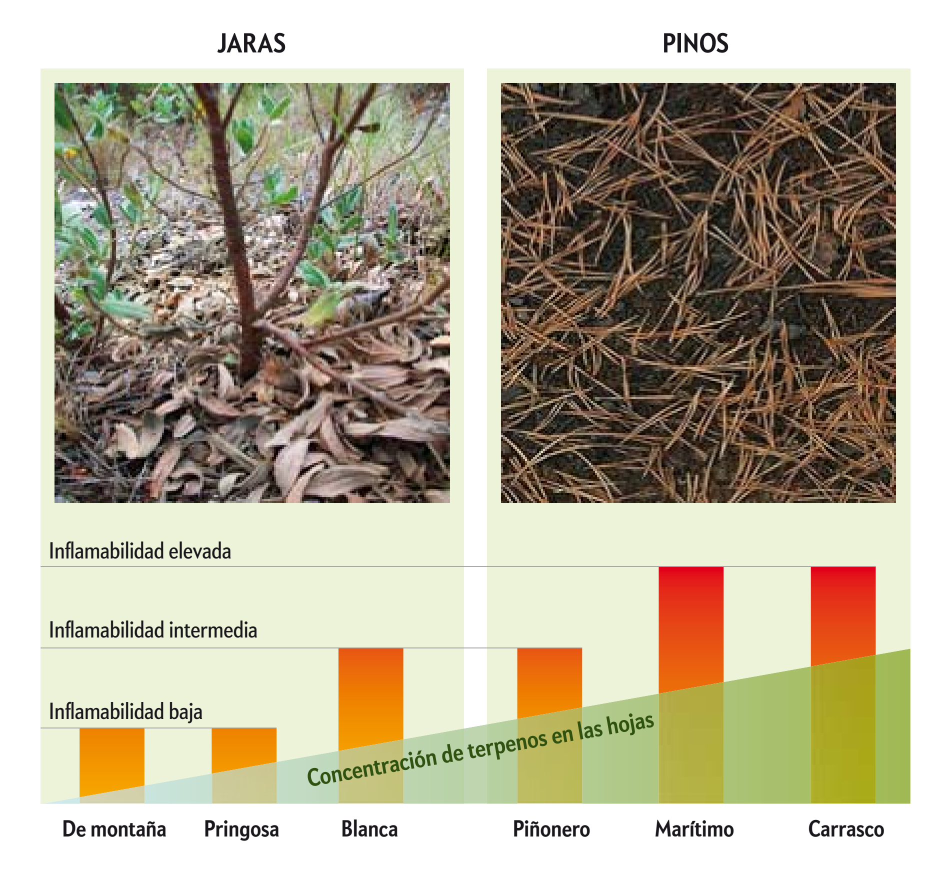
Los terpenos son sintetizados por la mayoría de las plantas, que los acumulan en sus tejidos o los liberan al ambiente. Una parte de estas sustancias se transfiere al medio por diversos procesos, principalmente la volatilización desde las hojas, la lixiviación o arrastre por la lluvia, y la exudación desde las raíces (*flechas*).

Tales compuestos volátiles ejercen distintos efectos sobre su entorno: sobre las plantas vecinas, al modificar (normalmente reducir) su crecimiento y supervivencia; sobre el conjunto del ecosistema, al influir en la biodiversidad vegetal (en general, de modo negativo) y en las relaciones tróficas (evitan la herbivoría, fomentan la polinización), y sobre la baja atmósfera, por su efecto contaminante.

Otra parte de los terpenos se acumulan en la planta, donde desempeñan diversas funciones protectoras frente al exceso de luz, sequía y contaminación gracias a sus propiedades antioxidantes, y frente a la herbivoría. Por sus características inflamables también contribuyen a aumentar el riesgo de incendio.

Una vez que las hojas caen de los árboles y arbustos, los terpenos permanecen en el mantillo del suelo, donde ralentizan su descomposición y regulan la disponibilidad de los nutrientes edáficos.





La elevada inflamabilidad de los bosques de pino carrasco y de pino marítimo está en parte causada por la alta concentración de terpenos en la hojarasca de estos árboles; de ello se desprende la necesidad de una gestión adecuada de este tipo de mantillo para disminuir el riesgo de incendio forestal. La hojarasca de jara, en cambio, se caracteriza por una inflamabilidad media y baja, por lo que su contribución al riesgo de incendio es menor.

cos con el fin de aumentar la probabilidad de que algunos de ellos ejerzan un efecto protector.

¿POR QUÉ PRODUCEN TERPENOS LAS PLANTAS?

En la actualidad existe una notable unanimidad sobre las funciones defensivas de los terpenos. Se conoce bien el papel de estas moléculas ante las agresiones bióticas, como la herbivoría o las infecciones causadas por patógenos víricos, bacterianos o fúngicos. Así, algunas plantas mediterráneas, como el enebro rojo (*Juniperus oxycedrus* L.), la sabina negral (*Juniperus phoenicea* L.) y la siempreviva del monte (*Helichrysum stoechas* L. Moench), presentan una elevada concentración de terpenos en las hojas que, debido a su toxicidad, dejan de ser consumidas por sus principales depredadores (ovejas y cabras). Además, las especies mediterráneas aromáticas, como el tomillo y el orégano, contienen cantidades notables de timol y carvacrol, compuestos terpénicos que a partir de cierta concentración inhiben el crecimiento de numerosas bacterias (*Escherichia coli, Micrococcus luteus, Bacillus subtilis* y *Staphylococcus aureus*, entre otras).

Los terpenos ofrecen igualmente protección a nivel celular y tisular frente a agresiones abióticas como el exceso de luz, la sequía o la contaminación atmosférica. Tales perturbaciones dan lugar a la formación de productos oxidantes (especies reactivas del oxígeno) en las células vegetales que limitan el desarrollo de la planta, efecto que contrarrestan los terpenos gracias a sus propiedades antioxidantes. Se ha demostrado así que, cuando se inhibe la emisión de isopreno (el terpeno más volátil) mediante ingeniería genética o mediante la aplicación de antibióticos o herbicidas sobre la planta, se reduce de modo notable su actividad fotosintética, pues la maquinaria celular que interviene en la fotosíntesis queda dañada por los agentes oxidantes. De manera similar, si a una planta que no produce isopreno u otros terpenos espontáneamente se le aportan estos compuestos por vía externa, las hojas fijan más CO_2 del entorno.

Los terpenos con un papel defensivo, es decir, aquellos que son activos o funcionales, son sintetizados por la planta de forma continua (terpenos constitutivos) o solo en el momento en que se ve agredida por un agente externo (terpenos inducidos). Si bien en numerosos estudios se ha demostrado que estas moléculas confieren protección a la planta que los produce, la complejidad de su acción reside en que un mismo compuesto puede ser funcional en una especie y resultar inactivo en otra. Se dice, por tanto, que la función de estas sustancias no es universal. Cabe señalar, según ya indicó Josep Peñuelas, investigador del CSIC y director de la Unidad de ecología global del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales en la Universidad Autónoma de Barcelona, que al ser volátiles los terpenos, su emisión por las plantas no se puede evitar. Por tanto, puede que en su origen su liberación careciera de significado y, solo después, mediante procesos evolutivos y la selección natural, algunos de los compuestos habrían adquirido una función determinada en la planta.

EFECTOS SOBRE OTRAS PLANTAS

Los terpenos se transfieren al medio por la acción de arrastre de la lluvia (lixiviación), la secreción a través de las raíces (exudación radicular) o por volatilización, principalmente desde las hojas. Estas emiten terpenos a través de la capa cerosa que las protege frente a la desecación (la cutícula) y a través de los poros de las superficies foliares que regulan el intercambio gaseoso y la transpiración (los estomas).

Una vez liberados al ambiente, los terpenos desempeñan un papel importante en las relaciones tróficas del ecosistema. Por un lado, intervienen en las interacciones que tienen lugar entre las plantas y los insectos polinizadores. En efecto, las plantas emiten una mayor cantidad de ciertos terpenos para fomentar la polinización y favorecer su propia reproducción. Por ello, con frecuencia la época de mayor floración coincide con la máxima emisión de terpenos y actividad de los polinizadores; de este modo, la planta se asegura de que sus flores sean fecundadas y se inicie la formación de frutos y semillas.

Por otro lado, las plantas producen terpenos que resultan repelentes para los herbívoros. Asimismo, estos compuestos intervienen en relaciones más complejas cuando acarrean la atrac-

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LAS AUTORAS

ción de carnívoros que se alimentan de modo específico de los herbívoros agresores, con lo que la planta queda protegida de manera indirecta. Investigaciones recientes han puesto también de manifiesto que, ante una situación de estrés, cuando una planta libera terpenos, las vecinas descifran el significado de estos compuestos. Gracias a este lenguaje químico entre vegetales, la planta receptora genera a su vez compuestos terpénicos defensivos y queda así protegida frente al factor de estrés.

En el ecosistema, la producción de esos metabolitos puede acarrear consecuencias en la biodiversidad y la abundancia de una especie. Nuestro equipo ha demostrado el efecto de mezclas naturales de compuestos terpénicos y fenólicos extraídos de las hojas y las raíces del pino carrasco sobre la germinación y el desarrollo de individuos de la misma especie. Se ha observado que cuando estas mezclas provienen de individuos adultos, los metabolitos secundarios limitan el crecimiento de sus plántulas, lo que puede frenar la progresión del bosque. Se ha determinado así que esta especie genera compuestos autotóxicos, es decir, con un efecto perjudicial sobre sí misma. Ello explica en parte por qué los pinares de pino carrasco, al madurar, presentan claras dificultades de regeneración y dejan paso a otro tipo de bosque formado por encinas (*Quercus ilex* L.), especie que predomina en las formaciones vegetales más tardías de la sucesión vegetal.

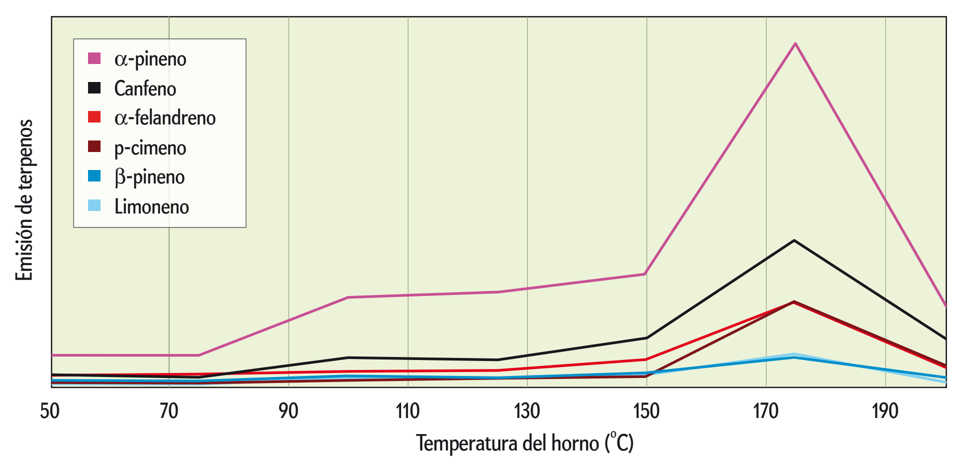
La autotoxicidad forma parte de un fenómeno más general, la alelopatía, que permite a las plantas influir sobre otras mediante la liberación al medio de metabolitos secundarios, entre ellos los terpenos. El efecto puede ser directo, si los compuestos alcanzan directamente al organismo receptor, o indirecto, si dichos compuestos alertan a un tercer organismo vecino, que a su vez ejerce alguna acción sobre el organismo con el que la planta pretende realmente interaccionar. Los compuestos alelopáticos pueden tener una influencia positiva o negativa, aunque suele ser negativa, pues a menudo los terpenos de una planta reducen el crecimiento de las plantas vecinas. Para que los metabolitos secundarios se califiquen de alelopáticos, se requiere que cumplan tres condiciones: la planta debe producirlos y liberarlos al entorno en cantidades suficientes; deben alcanzar alguna planta u otro organismo en la proximidad; y ha de observarse algún efecto positivo o negativo en el organismo receptor. Por consiguiente, cabe precisar que los terpenos producidos por una planta no son necesariamente alelopáticos, pero pueden serlo si se dan las circunstancias mencionadas.

MAYOR RIESGO DE INCENDIOS

Tradicionalmente se ha dado por supuesto que los terpenos también influyen en el ecosistema de otro modo: fomentando el riesgo de incendio forestal. Esta hipótesis reposa en el hecho de que las especies resinosas son altamente inflamables y las resinas contienen concentraciones elevadas de terpenos. Además, el hecho de que los terpenos posean un elevado contenido calórico y sean sustancias inflamables ha hecho pensar que estos compuestos aumentan la inflamabilidad de la vegetación.

Sin embargo, solo los trabajos de M. K. Owens y sus colaboradores del Centro Texas A&M de Investigación Agrícola y Centro de Investigación de Uvalde (Texas), publicados en 1998, han demostrado parcialmente que los terpenos aumentan la inflamabilidad de las plantas y facilitan la propagación del fuego. Los ensayos de Owens fueron llevados a cabo con plantas y teniendo en cuenta un único parámetro de la inflamabilidad, a saber, la cantidad de combustible consumido. El investigador comprobó que las plantas que contenían más terpenos se quemaban en una mayor proporción. Estos resultados con plantas enteras no se han vuelto a confirmar en estudios posteriores. Sin embargo, nuestro grupo ha corroborado este fenómeno en la hojarasca que se acumula en la superficie del suelo. En concreto, hemos observado que la concentración de terpenos de la hojarasca guarda relación con numerosos componentes de la inflamabilidad, tales como el tiempo de ignición, el tiempo de residencia del fuego, la altura de la llama y la velocidad de avance de esta.

Nuestros trabajos se han realizado en colaboración con el grupo de ecología del fuego de la Universidad de Castilla La Mancha y gracias a la cooperación del Centro de Ensayo e Investigación para la Protección Forestal (CEREN), creado por el Ministerio del Interior francés. Hemos demostrado que la hojarasca del pino carrasco y del pino marítimo (*Pinus pinaster* Aiton) que se acumula en el suelo presenta una enorme inflamabilidad; la del pino piñonero (*Pinus pinea* L.) y la jara blanca (*Cistus albidus* L.) es media, y la de la jara pringosa (*Cistus laurifolius* L.) y la jara de montaña (*Cistus ladanifer* L.) muy débil. Se ha descubierto que en las especies más inflamables la





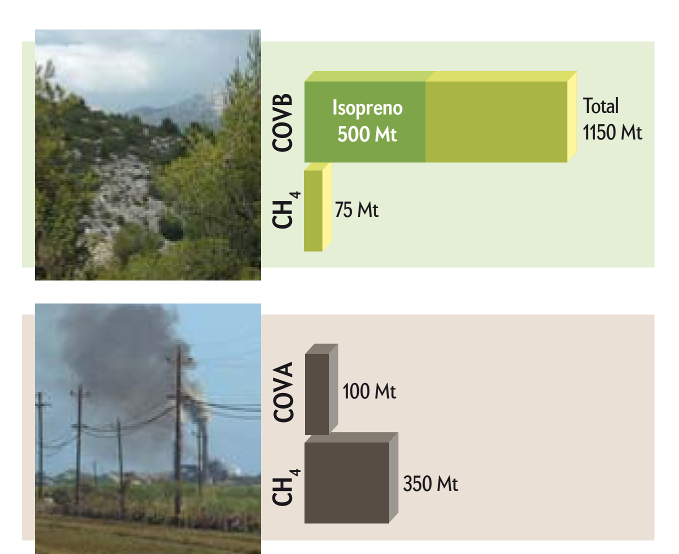
Liberación de distintos compuestos terpénicos de las hojas de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) tras exponerlas a un gradiente creciente de temperaturas, entre 50 y 210 °C. Las emisiones máximas aparecen a unos 180 °C, tras lo cual se estima que los tricomas de las hojas que almacenan los terpenos quedan en gran parte vacíos. Los compuestos liberados contribuyen a aumentar la inflamabilidad de la vegetación.

A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR N. RAFFALI DEL CEREN EN EL MARCO DEL INFORME MINISTERIAL CON NÚMERO DE CONVENIO 61.45.80.03/02 (*gráfica*); WIKIMEDIA COMMONS/LIONEL ALLORGE/CC BY-SA 3.0 (*romero*)

llama aparece antes, la velocidad de combustión y la altura de llama son superiores, y el material se consume con mayor rapidez. Se ha observado asimismo una concentración en terpenos alta, media y baja, respectivamente, en los tres grupos de especies. En resumen, se ha puesto de manifiesto una relación positiva entre el contenido en terpenos y la inflamabilidad de la hojarasca de especies mediterráneas comunes. Si bien estos resultados demuestran que los terpenos contribuyen al riesgo de incendio, no implica en ningún caso que otras moléculas de las plantas no influyan sobre la inflamabilidad.

Además, los trabajos realizados por el CEREN han permitido avanzar en la comprensión del papel que desempeña la vegetación en los incendios que se originan por causas naturales (sobre todo, rayos). En estos ensayos se sometió al romero, una planta que acumula grandes cantidades de terpenos en sus tricomas foliares, a un intervalo de temperaturas de entre 50 y 200 ºC con el fin de evaluar las concentraciones atmosféricas de estos compuestos. Se observó, en torno a los 180 ºC, un pico de emisión de cada uno de los monoterpenos detectados. Los resultados sugieren que la vegetación cercana a un incendio libera cantidades enormes de terpenos a la atmósfera y contribuye a aumentar la inflamabilidad del aire.

Los diferentes estudios mencionados permiten afirmar que los terpenos almacenados en la vegetación constituyen un factor biótico que determina, en parte, la intensidad de los incendios naturales. Ello tiene una enorme relevancia para la región mediterránea, donde los incendios son la mayor causa de pérdida de superficie forestal. ¿Qué medidas deberían adoptarse? Aunque la mayoría de los incendios forestales están provocados por el hombre, es necesario conocer en profundidad los factores naturales que aceleran y fomentan la intensidad y el avance del fuego. Puesto que el pino marítimo y el pino carrasco desprenden por unidad de superficie una gran cantidad de hojarasca altamente inflamable, nuestros resultados sugieren que una gestión forestal apropiada de estos pinares implica un control adecuado de la hojarasca que se acumula sobre el suelo. Y en las tareas de reforestación, podrían seleccionarse pinos con acículas menos inflamables, como el pino piñonero.



La vegetación constituye la mayor fuente de emisión de compuestos orgánicos volátiles biógenos (COVB), mayoritariamente terpénicos, pues libera, a escala mundial, 1150 millones de toneladas (Mt) de COVB anuales, lo que corresponde a 10 veces el nivel de COV de origen antrópico (COVA). Alrededor de la mitad de los COVB corresponde a isopreno liberado por los árboles. Estudios recientes demuestran que ciertas especies también desprenden metano (CH_4) en una cantidad que representa el 25 por ciento del que se libera a la atmósfera por medios no naturales.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LAS AUTORAS

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Debido a su volatilidad, los terpenos se engloban dentro de la categoría de compuestos orgánicos volátiles biógenos (COVB). A pequeña escala (por ejemplo, en el entorno de una ciudad), las emisiones de COVB son muy inferiores a las emisiones de COV antropógenos (COVA). Estos últimos provienen principalmente del uso de disolventes y otros productos en el sector industrial, así como de la combustión incompleta en el transporte. Sin embargo, a escala mundial, el 90 por ciento de los COV de la atmósfera son de origen biógeno y proceden sobre todo de las plantas vivas, siendo el isopreno el COVB más abundante. El mantillo (los restos animales y vegetales que se descomponen sobre la superficie del suelo), los sedimentos, los microorganismos y el fitoplancton también constituyen, aunque en menor medida, una fuente de emisión de terpenos y otros COVB.

A pesar de que en la atmósfera los terpenos se hallan en concentraciones mínimas, su presencia afecta a la calidad del aire porque intervienen en la formación de ozono troposférico. Es importante añadir que la formación de ozono a partir de terpenos atmosféricos, principalmente de isopreno y de monoterpenos, solo tiene lugar en presencia de luz solar y de óxidos de nitrógeno, estos últimos procedentes sobre todo de la contaminación automovilística. El aumento de la concentración de terpenos, y en general de COV, acarrea también consecuencias sobre la concentración de monóxido de carbono y la vida media de ciertos gases de efecto invernadero, como el metano.

En el último decenio se ha puesto asimismo de manifiesto que los terpenos incrementan la producción de aerosoles. En consecuencia, los terpenos que pertenecen al grupo de los COV tienen repercusiones indirectas en nuestra salud y también en el régimen de precipitaciones. En efecto, la contaminación atmosférica causada por los aerosoles y el ozono troposférico guarda una estrecha relación con la mortalidad asociada a problemas respiratorios. Por otro lado, los aerosoles pueden acelerar la aparición de lluvias, al favorecer la condensación de nubes y fomentar la formación de gotas de agua de mayor tamaño. Sin embargo, algunos estudios recientes llevados a cabo con satélites de la NASA demuestran un efecto contrario en las precipitaciones: cuando la concentración de aerosoles es muy elevada, el agua se reparte entre un mayor número de partículas, por lo que las gotas alcanzan un tamaño muy reducido. Las nubes formadas por gotas tan pequeñas difícilmente generan lluvia.

Debido a la importancia de los COV biógenos, estos se incluyen hoy en día en los modelos atmosféricos que se utilizan para realizar las previsiones de contaminación del aire. A partir de estos modelos, el laboratorio de Energía Química y Medioambiente de la Escuela Superior de Ingenieros y Técnicos de Toulouse cifró en 70.000 toneladas las emisiones anuales de COVB de la vegetación (la mayoría del tipo terpenos), en una superficie del sur de Francia. Se midió una cantidad semejante de emisiones de COVA, lo cual resulta sorprendente debido a la reducida escala del citado estudio. Ello se explica porque el área analizada abarca una zona industrial (la laguna de Berre) y grandes superficies de garriga (formada sobre todo por coscoja y romero) y bosques de pino carrasco que liberan grandes cantidades

de COV (del orden de 10 microgramos de COV por hora y por gramo de biomasa).

EMISIONES VARIABLES

Puesto que los terpenos que se hallan en los tejidos vegetales o se liberan a la atmósfera repercuten sobre la propia planta que los sintetiza y sobre su entorno, resulta importante saber cómo varía la producción de terpenos en función de las condiciones ambientales.

Nuestros trabajos han permitido demostrar que la acumulación y las emisiones de terpenoides de las hojas cambian con el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes, y la coexistencia de plantas en un espacio limitado (plantas competidoras). En los ensayos se han utilizado como modelo cuatro especies mediterráneas que se sabe producen una gran cantidad de estos compuestos: el romero (*Rosmarinus officinalis* L.), la jara blanca (*Cistus albidus* L.), el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) y la coscoja (*Quercus coccifera* L.). Se ha observado que ninguna de las cuatro especies emite isopreno, el terpeno biógeno más abundante, sino monoterpenos y, en menor medida, sesquiterpenos. El romero ha resultado la especie con la mayor producción de terpenos de estructuras muy diversas. En primavera esta especie libera cien veces más terpenos que la jara y diez veces más que el pino carrasco. Por otro lado, la jara presenta la mayor tasa de emisión de terpenos de las cuatro especies.



La emisión de terpenos se estudia por medio de cámaras de encerramiento en las que se introduce una rama o la planta entera. El aire que circula a través de la cámara se controla mediante medidores de flujo y sensores de CO_2 y de vapor de agua. La fijación de CO_2 guarda una estrecha relación con la emisión de terpenos en ciertas especies.

Se ha comprobado asimismo que la síntesis de terpenos varía en función de la naturaleza del suelo sobre el que crece la vegetación. El pino carrasco y la jara emiten mayores cantidades de terpenos cuando se desarrollan en suelos calizos o básicos. Por el contrario, la coscoja libera más terpenos al crecer sobre suelos silíceos o ácidos, lo que se ha interpretado como una respuesta a una situación de estrés, pues esta especie raramente medra en este tipo de suelos, sino que prefiere los suelos calizos.

El análisis del efecto de la sequía sobre los terpenos ha revelado que, con una disponibilidad de agua muy baja, las especies mediterráneas, bien sean arbustivas (romero, jara, coscoja) o arbóreas (pino carrasco), mantienen la emisión de monoterpenos. En los experimentos se ha comprobado que, a pesar de las condiciones extremas a las que se sometan las plantas (en maceta, expuestas al sol y sin riego durante diez días), estas siguen sintetizando tales compuestos. Probablemente lo hagan a expensas de otras sustancias menos útiles para sobrevivir en esas condiciones ambientales limitantes. Se podría avanzar que un régimen climático con sequías moderadas favorecería las emisiones de terpenos, aunque si las sequías fueran muy pronunciadas las emisiones disminuirían. Ello repercutiría, en un sentido u otro, sobre la salud vegetal, la calidad del aire y el riesgo de incendios. Pensamos que esos aspectos merecen ser estudiados en profundidad en futuros proyectos de investigación.

Respecto a los nutrientes presentes en el suelo, nuestros datos han puesto de manifiesto que la liberación de terpenos del romero y del pino carrasco aumenta con la cantidad de nitrógeno y de fósforo en el suelo. Ello hace pensar que ante la eutrofización creciente de nuestros suelos, que acumulan nutrientes procedentes de la contaminación agropecuaria, forestal y atmosférica, los ecosistemas en los que crecen estas especies se harían más inflamables y empeorarían la calidad del aire.

El último de los aspectos abordados ha sido la emisión de terpenos de las especies en función de las plantas que se desarrollan en su proximidad. Observamos que el pino carrasco, cuando crece solo o junto con la coscoja, emite más terpenos que cuando lo hace junto al romero o la jara. En cambio, la jara blanca produce menos terpenos cuando se desarrolla cerca del pino carrasco, el romero o la coscoja. Se deduce, por tanto, que las comunidades vegetales mediterráneas liberan más o menos terpenos hacia la atmósfera en función de su composición florística, lo que demuestra una vez más la complejidad de las condiciones ecológicas que favorecen las emisiones.

En conclusión, la liberación de terpenos por las plantas guarda relación con los cambios que se producen en el entorno, ya sean naturales o estén causados por el hombre. El papel defensivo de estas sustancias para los vegetales, sus consecuencias en la biosfera y los factores que modifican su emisión son sin embargo complejos y por ello a la ciencia le está costando décadas entenderlos e interpretarlos. Los estudios prometedores realizados por investigadores de disciplinas diversas parecen indicar que no hemos hecho más que empezar a descifrar el significado y las consecuencias de los terpenos de las plantas.

PARA SABER MÁS

Plants talk, but are they deaf? M. Dicke, A. A. Agrawal y J. Agrawal en *Trends in Plant Science*, vol. 8, págs. 403-405, 2003.

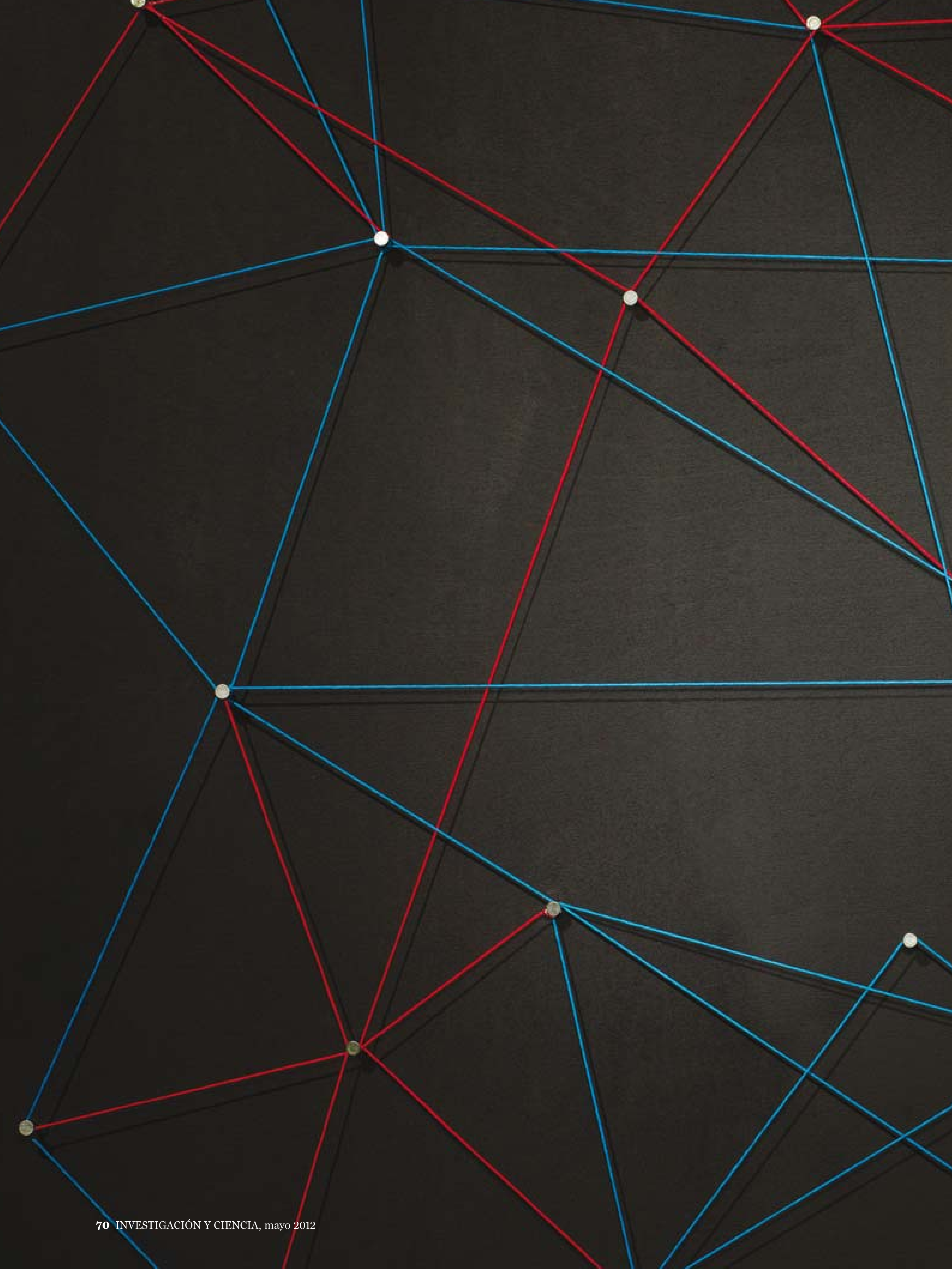
Plant VOC emissions: making use of the unavoidable. J. Peñuelas, J. Llusià en *Trends in Plant Science*, vol. 19, n.º 8, págs. 402-404, 2004.

Isoprene emission from plants: Why and how. T. D. Sharkey, A. E. Wiberley y A. R. Donohue en *Annals of Botany*, vol. 101, págs. 5-18, 2008.

The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. E. Ormeño, B. Céspedes, I. A. Sánchez, A. Velasco-García, J. M. Moreno, C. Fernandez et al. en *Forest Ecology and Management*, vol. 257, págs. 471-482, 2009.

A unified mechanism of action for volatile isoprenoids in plant abiotic stress. C. E. Vickers, J. Gershenzon, M. T. Lerdau y F. Loreto en *Nature Chemical Biology*, vol. 5, págs. 283-291, 2009.

Extracting and trapping biogenic volatile organic compounds stored in plant species. E. Ormeno, A. Goldstein, U. Niinemets en *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30, págs. 978-989, 2011.



TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

LA RED EN LA SOMBRA

Los Gobiernos y algunas compañías ejercen sobre Internet un control sin precedentes. Para evitar bloqueos, filtraciones o cierres, algunos activistas propugnan el uso de redes autónomas descentralizadas

Julian Dibbell

LAUREN SHIELDS (*diseño*); DAN SAELINGER (*fotografía*)

EN SÍNTESIS

Internet fue concebida como un sistema descentralizado: cada nodo de la red debería hallarse conectado siempre a otros muchos. Esta arquitectura implica un sistema robusto frente a la censura y ataques externos.

Hoy, sin embargo, la mayoría de los usuarios se mantiene en los bordes de la red: su conexión con el resto pasa necesariamente por su proveedor de Internet. Si se corta ese enlace, desaparece el acceso al conjunto de Internet.

Esa estructura jerárquica facilita el control de la red y permite someterla con facilidad a bloqueos y censuras. Unos pocos proveedores actúan como focos centralizados de los que depende el acceso de la mayoría de los usuarios.

En los últimos años se ha popularizado una alternativa: las redes malladas. En ellas, cada nodo cuenta con múltiples conexiones, por lo que siempre se crean nuevas rutas de redistribución de la información cuando un nodo falla.

Julian Dibbell es escritor consagrado a temas relacionados con Internet y la cultura digital. Es autor de *Play money: Or how I quit my day job and made millions trading virtual loot* (Basic Books, 2006) y editó *The best technology writing* (Yale University Press) en 2010.



EL 28 DE ENERO DE 2011, AL FILO DE LA MEDIANOCHE,

el Gobierno de Egipto tomó una decisión insólita en la historia de las telecomunicaciones del siglo xxi: bloquear Internet. La resolución llegaba después de tres días de protestas multitudinarias contra el régimen, organizadas en gran parte a través de Facebook y otras redes sociales. Se desconoce a ciencia cierta cómo lo lograron, pero parece haber pruebas de que las autoridades solo necesitaron cinco llamadas telefónicas: una a cada uno de los grandes proveedores de servicios de Internet (PSI) del país. A las 00:12, Telecom Egypt, el mayor de ellos, comenzó a desconectar a sus abonados. Trece minutos después se sumaban los otros cuatro. Hacia las 00:40, la operación había finalizado. Se calcula que el 93 por ciento de la red egipcia se había vuelto inaccesible.

El apagón digital no ejerció gran efecto, ni estratégico ni táctico: a la mañana siguiente, el número de manifestantes congregados en la plaza Tahrir batió marcas. Pero, como lección sobre la vulnerabilidad de Internet, aquella desconexión masiva confirmaba fundados y antiguos temores.

Mucho se ha hablado de la capacidad de Internet para responder ante ataques semejantes. En ocasiones, se nos cuenta que sus orígenes técnicos se remontan a la Guerra Fría, cuando se buscaba una infraestructura de comunicaciones capaz de salir indemne de un ataque nuclear. Aunque no sea del todo cierto, la anécdota refleja con acierto la solidez inherente al diseño descentralizado de la red. El conjunto de protocolos TCP/IP en el que se funda Internet se basa en la existencia de trayectos múltiples y redundantes entre dos nodos cualesquiera, así como en su capacidad para incorporar nuevos nodos en cualquier momento. Esa arquitectura persigue garantizar el transporte de datos aunque varios nodos se hallen bloqueados, ya sea como consecuencia de un bombardeo nuclear o debido a la acción represiva de un régimen. En palabras del activista de derechos digitales John Gilmore: «Internet interpreta la censura como una avería y busca un camino que la rodee».

El conjunto de redes de comunicación interconectadas que componen Internet fue diseñado para reaccionar de esa manera. Pero si cinco llamadas telefónicas bastaron para privar de acceso a 80 millones de personas, podemos decir que hoy ese objetivo queda lejos. El apagón egipcio solo supuso el ejemplo más drástico en una lista creciente de acontecimientos similares. Un mes antes, durante la revolución en Túnez, el Gobierno de aquel país se había decidido por una estrategia más selectiva, consistente en bloquear solo algunas páginas nacionales. En Irán, durante las protestas que siguieron a las elecciones de 2009, el régimen logró ralentizar el tráfico. Durante años, el «gran cortafuegos chino» ha bloqueado el acceso a un sinnúmero de páginas. En las democracias occidentales, la consolidación de los proveedores de Internet ha otorgado a un número cada vez menor de grandes compañías el control de un volumen creciente de tráfico. En EE.UU., empresas como Comcast y AT&T han conseguido los incentivos y el poder necesarios para acelerar el tráfico de sus socios a expensas del de sus competidores.

¿Qué ha ocurrido? ¿Es posible recuperar una Internet resistente a los estrangulamientos y cortes provocados por Gobiernos y empresas? Desde hace algún tiempo, un grupo reducido pero muy especializado de activistas digitales busca una manera de salir del atolladero.

Es una tarde de verano en la central eléctrica de Viena-Semmering. Aaron Kaplan acaba de pasar siete minutos encerrado en la estrecha y oscura cabina del montacargas que le ha traído hasta lo alto de la chimenea de 200 metros, la estructura más alta de la ciudad. Desde la plataforma superior, puede divisar las faldas de los Alpes hacia el oeste, la frontera eslovaca en la dirección opuesta y el Danubio a sus pies. Pero Kaplan no ha subido para disfrutar del paisaje, sino para

poner a punto cuatro enrutadores Wi-Fi situados en el borde de la plataforma y atornillados a la barandilla.

Esos enrutadores constituyen uno de los nodos de la red comunitaria sin ánimo de lucro FunkFeuer, de la que Kaplan es cofundador y promotor principal. Las señales inalámbricas que captan y redirigen esos aparatos los unen, de manera directa o indirecta, con otros 200 nodos de características similares, instalados en los tejados de la capital austríaca. Cada uno de ellos pertenece al usuario que lo instaló, quien se encarga también de su mantenimiento. Forman parte de una conexión colectiva a Internet de alta velocidad que se extiende a lo largo de una zona casi tan vasta como la que otea Kaplan.

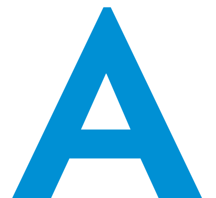
FunkFeuer es una red inalámbrica mallada. Para conectarse a ella no se requiere abonar ninguna tarifa, tan solo adquirir un dispositivo cuyo precio no llega a 120 euros, colocarlo sobre un tejado y establecer una conexión con al menos otro aparato que se encuentre dentro de su radio de alcance. Para un funcionamiento óptimo, basta con que cada nodo se halle enlazado a unos pocos más, puesto que cada uno de ellos redistribuye a sus vecinos más próximos los datos destinados a los nodos situados fuera de su alcance.

En 2003, pocos meses después de que Kaplan y Michael Bauer pusieran FunkFeuer en marcha, el número total de nodos apenas rondaba la docena, lo que dificultaba sobremanera su funcionamiento. El fallo de uno solo de ellos podía provocar la desconexión del conjunto o, peor aún, dejarlos aislados del nodo de enlace externo, el encargado de conectarse con Internet. En aquella época, mantener la conexión las 24 horas «costaba un triunfo», recuerda Kaplan. Él y Bauer han llegado a encontrarse en un tejado a las dos de la madrugada, en medio de una tormenta de nieve y a 15 grados bajo cero para reparar un enrutador defectuoso, con una taza de vino caliente como único antídoto contra el frío. A medida que las posibilidades de FunkFeuer se popularizaron entre la comunidad local, la red fue creciendo. Al llegar a los 30 o 40 nodos, su topología ya aseguraba que, aunque alguno de ellos fallase, los demás siempre encontrarían un camino alternativo para transmitir la información. Habían alcanzado la densidad crítica en la que, según Kaplan, «irrumpe la magia de las conexiones en malla».

Aunque las redes en malla datan de hace poco, la magia a la que se refiere Kaplan no supone nada novedoso. Responde al mismo principio que, desde hace tiempo, apuntala la robustez de la que hace gala Internet. La búsqueda de caminos basada en la conmutación de paquetes por almacenamiento y retransmisión de datos posibilita que todo ordenador de la red no solo pueda enviar y recibir información, sino también redistribuirla en nombre de los demás. Ese principio ha sido siempre una de las características definitorias de la arquitectura de Internet. A ella se debe su facilidad para hallar vías de transmisión alternativas cuando la red sufre daños, y en ella se basa la supuesta inmunidad de Internet a cualquier ataque.

Si el funcionamiento actual de Internet se ajustase más a la teoría, las redes malladas resultarían superfluas. Sin embargo, en las dos décadas transcurridas desde que Internet saliera del armario del mundo académico para convertirse en el servicio omnipresente que conocemos hoy, la técnica de almacenamiento y retransmisión ha ido perdiendo terreno. Durante los últimos años, la inmensa mayoría de los nuevos nodos que se han incorporado a Internet han sido ordenadores cuya conexión se efectúa por medio de grandes proveedores. Cuando el enlace lo proporciona un PSI, el ordenador del usuario queda reducido a un nodo terminal, uno que jamás desempeña funciones de retransmisión. Su configuración solo le permite enviar y recibir datos, y ello únicamente a través de los equipos pertenecientes al PSI. En otras palabras, la enorme expansión de Internet solo ha servido para añadir muchísimos más callejones sin salida que rutas nuevas. Eso, a su vez, ha otorgado a los PSI y a otros agregadores de tráfico un enorme control sobre los cientos de millones de nodos a los que prestan servicio, los cuales carecen de alternativas si su PSI cae o los desconecta. Lejos de proteger a Internet de los ataques, los PSI se han convertido más bien en su freno de emergencia.

Las redes malladas proporcionan al usuario justamente lo que el PSI le niega: la posibilidad de que su equipo opere como retransmisor de datos; con ello, deja de ser un mero consumidor de Internet y comienza a funcionar como servidor. Imaginemos los sucesos del 28 de enero de 2011 si, en lugar de depender de los PSI, los ciudadanos egipcios hubiesen estado conectados a través de redes en malla. No hubieran bastado cinco llamadas para bloquear la red. Dado que cada usuario de una red mallada controla su pequeña porción de la infraestructura, hubiera sido necesario convencer a cada uno de ellos... amén de una dosis de persuasión mucho mayor que la invertida en los gerentes de los grandes proveedores.



sus 37 años, Sascha Meinrath ha sido uno de los principales promotores de las redes malladas comunitarias desde que estas existen. Mientras estudiaba en la Universidad de Illinois, ayudó a establecer la Red Inalámbrica Comunitaria de Champaign-Urbana (CUWiN), una de las primeras de este género en EE.UU. Más tarde, tras el huracán Katrina, cooperó con un equipo de voluntarios para crear una red en malla especializada que, durante las primeras semanas, restableció las comunicaciones dentro de un radio de 60 kilómetros. A continuación, se trasladó a Washington D.C. para poner en marcha un negocio de redes inalámbricas comunitarias. Sin embargo, acabó siendo «cazado», en sus propias palabras, por la New America Foundation, un poderoso centro de estudios estratégicos que lo contrató para concebir y supervisar innovaciones tecnológicas. Fue allí donde, a principios de 2011, inició el proyecto Commotion, una empresa de comunicaciones inalámbricas malladas de código abierto, subvencionada con dos millones de dólares por el Departamento de Estado de EE.UU.

El objetivo a corto plazo de dicho proyecto consiste en desarrollar técnicas que sorteen cualquier dispositivo de bloqueo y todo tipo de vigilancia centralizada. Para plasmar esta idea, Meinrath y otros promotores de Commotion han diseñado un prototipo conocido como «Internet en la maleta»: un pequeño equipo integrado de comunicaciones inalámbricas, apto para ser introducido de manera clandestina en un país que se encuentre bajo un régimen represor. Una vez allí, los disidentes y activistas podrían utilizarlo para obtener una conexión a Internet inmune a cualquier bloqueo. El dispositivo contiene un burdo pero efectivo instrumental que cualquier aficionado a las redes en malla comunitarias podría montar y mantener en funcionamiento.

En última instancia, Meinrath y su grupo se proponen construir un sistema que resulte sencillo de operar incluso para los legos en cuestiones técnicas (la gran mayoría de la población). La razón es sencilla: cuantas más personas se suman a una malla, más difícil resulta bloquearla. Y no solo porque cerrar nodo

a nodo una red con 1000 usuarios cueste mucho más que clausurar una que solo posea 100, sino porque una malla de gran tamaño contará, por lo general, con un número mayor de nodos de enlace externo (aquellos que, esparcidos por la red, actúan como portales con el resto de Internet). Cuantos más nodos de enlace externo se encuentren disponibles, menos comunicaciones se interrumpirán si se bloquea una de las conexiones con la red global. Además, dado que cualquier nodo puede, en principio, convertirse en un enlace con la red global si se dispone de un módem o un teléfono móvil, un mayor número de usuarios implica una mayor capacidad para restablecer la conexión con el mundo exterior.

Vistas las ventajas de una malla de gran tamaño, una pregunta que ocupa cada vez más a los partidarios de estas infraestructuras reside en su aplicabilidad a gran escala. Al respecto, una cuestión abierta consiste en determinar hasta qué punto un aumento considerable en el número de nodos atascaría la red. Hace pocos años, algunos técnicos sostenían que una malla jamás soportaría más de unos centenares de nodos. Pero, hoy en día, las redes malladas «puras» de mayor tamaño operan con miles de ellos, y existen docenas de infraestructuras híbridas de malla y jerárquicas que suman 5000 nodos (como la Red Inalámbrica Metropolitana de Atenas) y otras que alcanzan los 15.000 (como Guifi.net, en el interior y los alrededores de Barcelona). Quizá la principal duda relativa al crecimiento de este tipo de arquitecturas resida en el posible rechazo de la población a una técnica artificiosa y relativamente compleja.

Al contrario que casi todas las iniciativas de código abierto, las cuales tienden a subestimar la importancia de una interfaz agradable y fácil de usar, los partidarios de las redes malladas ya han comenzado a apreciar las virtudes de un equipo sencillo. En este aspecto, aunque Commotion no sea el único proyecto que persigue simplificar las redes comunitarias, su propuesta destaca por su radicalidad: en lugar de facilitar la instalación y el funcionamiento de un nodo en el domicilio o en la empresa del usuario, pretende hacer de ello algo innecesario. La idea, según explica Meinrath, consiste en reprogramar los teléfonos móviles, ordenadores portátiles o enrutadores inalámbricos ya existentes y construir la red a partir de ellos, lo que él denomina una red con «infraestructura de dispositivos». Meinrath imagina un futuro en el que, para añadir un nuevo nodo a la malla, baste con pulsar sobre un icono en nuestro iPhone o Android.

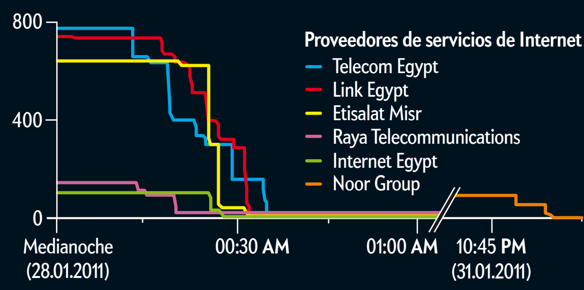
IMAGINEMOS POR UN MOMENTO UN MUNDO EN EL QUE LAS REDES malladas hayan superado el obstáculo de la accesibilidad y se hayan convertido en una aplicación más de nuestro teléfono. ¿Qué ocurriría? ¿Acabaría algo así con el feudo de los grandes proveedores de Internet y veríamos emerger una gigantesca malla global?

Ni siquiera los defensores más ardientes de una red descentralizada apuestan por ello. «Este sistema siempre será, en mi opinión, una Internet para pobres», sostiene Jonathan Zittrain, profesor de derecho en Harvard y autor de *The future of the Internet and how to stop it* («El futuro de Internet y cómo pararlo», Yale University Press, 2008). Zittrain se muestra partidario de las redes en malla, pero reconoce que nunca alcanzarán la eficiencia de algunos de los servicios que prestan las arquitecturas más centralizadas, las cuales «aportan beneficios reales, como su facilidad de uso», explica. También el fundador de Guifi.net, Ramon Roca, duda de que las redes malladas acaben des-

Los peligros de las redes centralizadas

El año pasado, el Gobierno egipcio logró algo insólito: en unas pocas horas, dejó a la población sin acceso a Internet. Para ello bastó que los cinco grandes proveedores del país cortasen el acceso a sus respectivos usuarios. Solo sobrevivió el sistema de Noor Group, que atiende a la Bolsa egipcia. Cuatro días después, también fue suprimido.

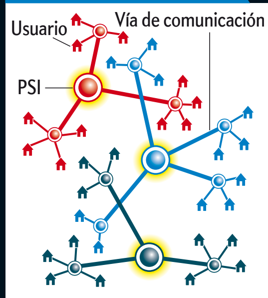
Conexiones activas a Internet



Sistemas de conexión radial

Hoy en día, cada usuario de Internet depende de una sola conexión para acceder a la red global: la que le proporciona su proveedor de Internet (PSI). Cada PSI presta servicio a millones de personas. Si falla, todos sus usuarios pierden el acceso a la red.

Funcionamiento normal



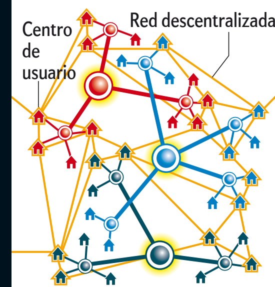
Caída del PSI



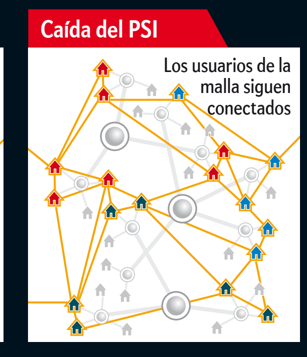
Red en malla descentralizada

En una red mallada, cada usuario puede recibir y reenviar la información en nombre de terceros. Con esta arquitectura, la caída de un PSI podría ralentizar la comunicación pero no cortarla por completo, ya que siempre aparecerían nuevos caminos que evitasen los nodos primarios.

Funcionamiento normal



Caída del PSI



GRÁFICOS DE BROWN BIRD DESIGN; FUENTE: JAMES COWIE, BLOG RENESYS (*datos de Egipto*)

plazando por completo a los PSI. Roca considera que, como máximo, les arrebatarían un 15 por ciento del mercado. Sin embargo, incluso un porcentaje tan exiguo serviría para «sanear» el mercado, pues pondría Internet al alcance de las familias con menos medios y serviría de acicate para que los grandes PSI bajasen sus tarifas.

Pero, por más que tales efectos económicos pudiesen resultar atractivos, los principales beneficios de las redes malladas seguirían siendo aquellos de carácter social: su resistencia intrínseca al control y la censura. Y, para que estos se tornasen efectivos, las redes comunitarias deberían gozar de una cobertura muy superior al 15 por ciento. Dado que las fuerzas del mercado no parece que vayan a elevar por sí solas dicha proporción, cabe preguntarse qué hacer para conseguirlo.

Cuando el mercado no basta para proporcionar un bien social, a quien primero se suele acudir es al Gobierno. En principio, este no parece un mal lugar por el que empezar: la misma red que «interpreta la censura como una avería y busca un camino que la rodee», como puntualizaba Gilmore, bien puede servir para encontrar rutas alternativas ante daños reales. Ello la convertiría en un medio de comunicación ideal en caso de terremotos, huracanes y otras catástrofes. Zittrain opina que los Gobiernos deberían tomar parte activa a la hora de extender las redes malladas, no solo entre los disidentes extranjeros, sino también entre sus propios ciudadanos. Para ello, bastaría con exigir que los teléfonos móviles viniesen equipados con los medios necesarios para, en caso de emergencia, convertirse en nodos de malla. «Los organismos nacionales de seguridad y justicia seguramente lo acogerían muy bien», concluye.

El problema reside en que, con igual facilidad, cabe imaginar a los mismos organismos de seguridad advirtiendo contra el peligro de que las redes malladas se conviertan en refugio de delincuentes y terroristas, quienes encontrarían en ellas un medio de comunicación a salvo de escuchas y PSI que los vigilen. En otras palabras, parece difícil contar con la colaboración gubernamental para poner en marcha un servicio de redes malladas cuando, a menudo, son los Gobiernos quienes perpetran los daños que esta forma de comunicación pretende esquivar.

No parece, por tanto, que su popularización vaya a llegar de la mano de los Gobiernos ni de los mercados. Con todo, Eben Moglen, profesor de derecho en la Universidad de Columbia y abogado durante años en la Fundación para el Software Libre, cree que existen alternativas. En febrero de 2011, a raíz de los sucesos en Túnez, Moglen anunció el lanzamiento de FreedomBox, un proyecto que, en apenas cinco días, recaudó 60.000 dólares gracias al sitio de financiación colectiva Kickstarter.

FreedomBox guarda no pocas semejanzas con Commotion —de hecho, Meinrath forma parte de la junta técnica asesora de FreedomBox—. Al igual que este, también el proyecto de Moglen rompió esquemas con su prototipo: un dispositivo del tamaño de un ladrillo, cuyo precio asciende a 149 dólares y que Moglen promete remplazar pronto por otro que cueste menos de la mitad. Pero, al igual que Commotion, FreedomBox tampoco se basa en ningún aparato concreto: se trata de un código que puede usarse en cualquiera de los procesadores informáticos que, cada vez más, se encuentran conectados en red. Todos ellos podrían pasar a formar parte de una «red de iguales descentralizada» que restableciese el equilibrio en la privacidad. Hoy en día, los descodificadores de televisión e incluso algunos electrodomésticos, como las neveras inteligentes, vienen provistos de direcciones IP. Según Moglen, todos esos aparatos podrían convertirse en un FreedomBox.

Ello no solo descentralizaría la infraestructura de la red, sino también la de los datos. Moglen opina que la acumulación de datos de particulares en la nube que proporcionan gigantes como Google o Facebook supone una amenaza para la privacidad y la libertad de expresión no menor que la que implica concentrar todo el tráfico a través de PSI. Para contrarrestar esa tendencia, FreedomBox dará soporte a redes sociales alternativas, como Diaspora, la cual almacena los datos del usuario en su propio equipo y solo permite compartirlos con las personas elegidas a través de redes P2P (*peer-to-peer*, o «de igual a igual»).

Para Moglen, un papel fundamental en el proyecto lo desempeñará toda una generación de jóvenes que, a causa de su dependencia de las redes sociales, cada vez es más consciente de la vulnerabilidad que padecen las conexiones en línea. Este es el argumento en el que se apoya para motivar al gran número de programadores que participan en el proyecto y, probablemente, también el principal reclamo para atraer usuarios. Sin una campaña de activismo continuada, Moglen no considera probable que el usuario medio llegue, por sí solo, a hacerse cargo del enorme precio en libertad y privacidad que estamos pagando por acceder a Internet.

«La gente infravalora el daño que supone la pérdida de la privacidad [en la comunidad de Internet] en la misma medida en que rehúsa evaluar las consecuencias multiplicadoras de otros actos destructivos desde el punto de vista ecológico», como ensuciar o contaminar el entorno, observa Moglen. «En general, al ser humano le resulta difícil pensar en términos ecológicos. No es algo para lo que el cerebro de los primates haya evolucionado.»

Una afirmación como la anterior da a entender que la reinvención de Internet requerirá algo más que un reajuste tecnológico. Quizás haga falta un activismo político similar en alcance y miras al del movimiento ecologista. Si los Gobiernos y los mercados no pueden conducirnos a ese objetivo, quizá lo consiga un cambio de conciencia colectivo. Hace no tantos años, nadie reciclaba la basura; hoy, sí lo hacemos. Tal vez con las redes en malla ocurra algo parecido.

Aun entonces, ninguna medida técnica aislada bastará para preservar las libertades que Internet incorpora e inspira, pues tampoco una Internet ideal será capaz de resistir por sí sola las presiones sociales y económicas para volver a centralizarla. Las redes en malla suponen, precisamente, un dique contra tales embates. Kaplan, el fundador de FunkFeuer, considera que las redes malladas benefician a la comunidad, por lo que se muestra partidario de su crecimiento. Pero incluso una malla de cobertura mundial correría el riesgo de retroceder otra vez hasta el punto en el que nos encontramos hoy: «Las redes en malla no pueden sustituir a Internet: solo son una parte de ella. Aquí no hay cabida para las utopías».

PARA SABER MÁS

A survey on wireless mesh networks. I. F. Akyldiz y Xudong Wang en *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, n.º 9, págs. 523-530, septiembre de 2005.
FreedomBox: **freedomboxfoundation.org**
Funkfeuer: **www.funkfeuer.at**
Grupo de Investigación de Redes Malladas: **www.mesh-networks.org**

Scott R. White es profesor de ingeniería aeroespacial en la Universidad de Illinois. **Sharlotte L. B. Kramer, Solar C. Olugebefola, Jeffrey S. Moore** y **Nancy R. Sottos** investigan en ciencia de materiales en la misma universidad. **Benjamin J. Blaiszik** estudia las propiedades de los materiales a escala nanométrica en el Laboratorio Nacional Argonne de Illinois.

INGENIERÍA DE MATERIALES

Materiales de reparación autónoma

Ya resulta posible fabricar polímeros y compuestos que imitan los procesos biológicos de cicatrización. La técnica promete un sinfín de aplicaciones

Scott R. White, Benjamin J. Blaiszik, Sharlotte L. B. Kramer, Solar C. Olugebefola, Jeffrey S. Moore y Nancy R. Sottos

Nada hay que dure para siempre. Todo material de factura humana, ya sea el plástico de un juguete o el acero de un puente, acaba cediendo. Hasta hace poco, la única solución al problema consistía en inspeccionar y sustituir las partes deterioradas. Los seres vivos, en cambio, gozan de mecanismos de cicatrización que reparan los daños mecánicos por sí solos. La ciencia de materiales persigue desde hace tiempo la creación de polímeros y otras sustancias sintéticas que imiten esa capacidad natural de sanación. Durante los últimos años, este campo de investigación ha visto por fin sus primeros frutos. Al sufrir una grieta o un desgarro, dichos materiales pueden repararse a sí mismos y restaurar su funcionalidad original. La técnica augura productos más seguros y duraderos, al tiempo que apunta a un cambio en los paradigmas de la ingeniería y el diseño de materiales.

En líneas generales, los principios que guían la cicatrización sintética se basan en aquellos que observamos en los seres vivos. Ante una lesión, nuestro cuerpo reacciona con la inflamación de los tejidos y la coagulación de la sangre. A ello le sigue la proliferación celular en el lugar de la herida, lo que proporciona una matriz para la reparación. Por último, tiene lugar el remodelado de la matriz: el tejido vuelve a crecer hasta que cierra por completo la herida. Este último proceso puede prolongarse durante meses e incluso años según la gravedad del daño.

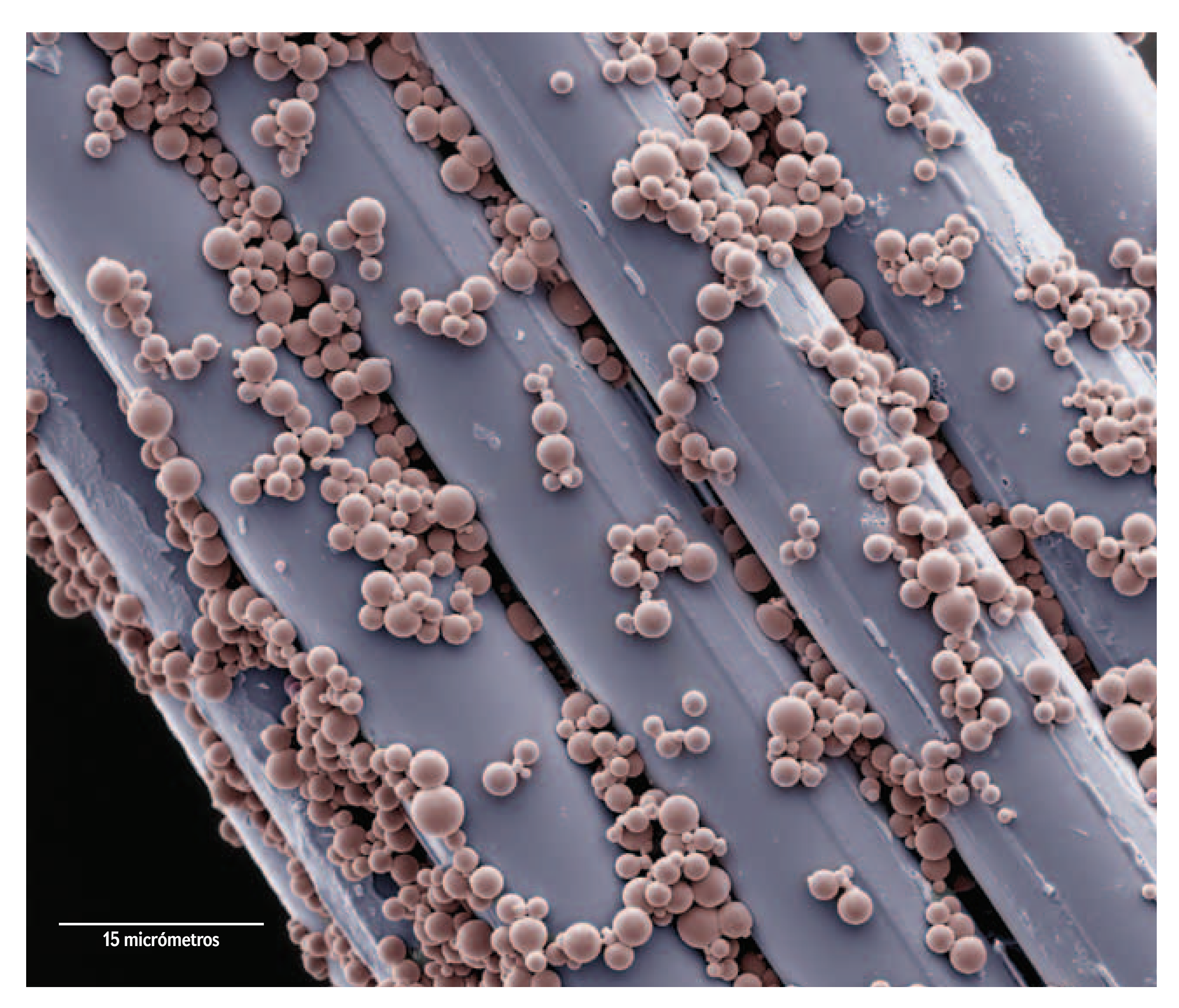
EN SÍNTESIS

Ya se han diseñado los primeros materiales dotados de propiedades de cicatrización. En ellos, un mecanismo de reparación autónoma se activa cuando se producen cortes, fisuras u otros tipos de daño.

Los agentes cicatrizantes se incorporan al material en forma de microcápsulas o en redes vasculares de fibras huecas. El daño provoca la ruptura de estas y, con ello, la liberación de las sustancias reparadoras.

También resulta posible fabricar polímeros cuyas propiedades químicas inducen una capacidad intrínseca de reparación. En ellos, la luz o el calor activan la reorganización de sus cadenas y la reparación del daño.

En ciertos casos ya se ha logrado que la cicatrización opere a la misma velocidad a la que se produce el daño. La resistencia mecánica del material reparado puede igualar o incluso superar a la del original.

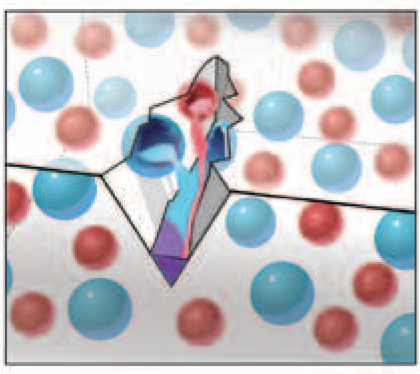


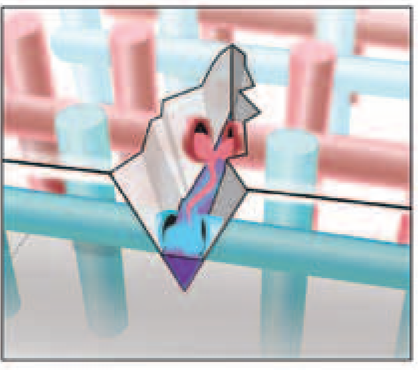
Fibras de refuerzo de un material compuesto recubiertas de cápsulas reparadoras. El diámetro de los gránulos es unas 10 veces menor que el de las fibras de vidrio, de unos 15 micrómetros (más finas que un cabello humano). Las cápsulas contienen un cicatrizante líquido que se libera cuando se producen daños en el material.

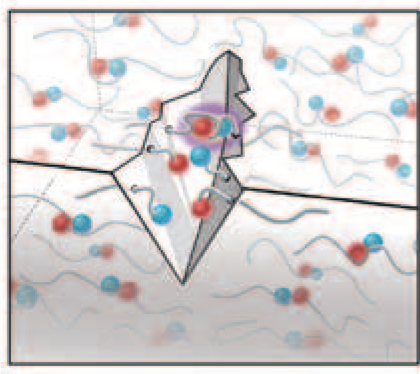
En los sistemas sintéticos, las fases del proceso resultan similares, aunque se suceden de manera más simplificada y a mayor velocidad. El daño activa el inicio del proceso. Al lugar se transportan con rapidez nuevos materiales, y la cicatrización ocurre cuando se crea una unión adhesiva con la parte dañada. En la mayoría de las ocasiones, el agente responsable de la cicatrización se compone de dos líquidos que se solidifican al mezclarse. Otras técnicas, en cambio, se basan en implementar en el material procesos de reparación química, análogos al remodelado de la matriz en los seres vivos. La duración del proceso de reparación autónoma depende del mecanismo de cicatrizado; por lo general, se prolonga entre varias horas y, como mucho, algunos días. Como objetivo último, se persigue que el ritmo de la reparación iguale al del daño, a fin de que el material se mantenga siempre incólume. La rapidez a la que se produce el deterioro depende en buena parte de factores externos, como la velocidad de deformación del material, los ciclos de carga y los valores de esta. Por su parte, el ritmo de cicatrización puede ajustarse al variar la temperatura o las velocidades de reacción química.

La mayoría de los avances en este campo se han conseguido durante el último decenio. Aunque, en teoría, todo material podría dotarse de un mecanismo de reparación autónoma, los resultados obtenidos con polímeros y compuestos reforzados con fibra destacan sobre los logrados con cerámicas o metales. Los mecanismos de cicatrización pueden clasificarse en tres grandes grupos: capsulares, vasculares e intrínsecos. Cada uno de ellos se caracteriza por el método empleado para mantener latente la función reparadora hasta que sobreviene el daño. También se diferencian en la cantidad de volumen deteriorado que pueden recomponer, en su facultad para actuar varias veces o no en una misma localización y en la velocidad de reparación.

Los materiales capsulares incorporan pequeños gránulos en cuyo interior se almacenan las sustancias encargadas de la cicatrización. El daño provoca la ruptura de las cápsulas, lo que activa el mecanismo de reparación en el mismo lugar en el que se produce el desperfecto. Una vez liberados, los agentes cica-







Existen tres clases de sistemas de reparación autónoma. En los capsulares (*izquierda*), una sustancia cicatrizante (*azul*) y un polimerizador (*rojo*) se hallan contenidos en pequeños gránulos repartidos por el seno del material. Los sistemas vasculares (*centro*) emplean una red de conductos rellenables para irrigar el material con dichas sustancias. Por último, algunos compuestos poliméricos gozan de propiedades de reparación intrínsecas (*derecha*); en ellos se aprovecha la naturaleza reversible de ciertos mecanismos de enlace químico.

DE: «SELF-HEALING POLYMERS AND COMPOSITES», POR B. J. BLAISZIK ET AL. EN *ANNUAL REVIEW OF MATERIALS RESEARCH*, VOL. 40, PÁGS. 179-211, 2010; JANET SINN-HANLON (*ilustración*)

trizantes no se reponen, por lo que el método permite solo una única reparación local. En los materiales vasculares, las sustancias reparadoras se hallan contenidas en una red de conductos microscópicos, la cual puede estar constituida por tubos aislados, planos de tubos interconectados o por un retículo tridimensional. Cuando los desperfectos quiebran los canales y se liberan los agentes restauradores, estos pueden reponerse (ya sea desde una fuente externa o a través de los canales indemnes), por lo que una misma localización puede experimentar varias cicatrizaciones. Por último, existen polímeros con una capacidad intrínseca para la reparación, debida por lo general a las propiedades químicas del material. Esta depende de mecanismos moleculares como la creación de enlaces por puentes de hidrógeno, interacciones iónicas, o la facultad de las cadenas de un polímero para desplazarse y entretejerse. Todos estos procesos son reversibles, lo que permite reparaciones múltiples.

CÁPSULAS REPARADORAS

Existen varias técnicas para fabricar cápsulas poliméricas que protejan el cicatrizante. Por lo general, se parte de una emulsión y el caparazón de la cápsula se forma sobre la interfase de las pequeñas gotas en suspensión. La cáscara así fabricada es fina y quebradiza, de manera que revienta con facilidad cuando se le aplica una fuerza. Otro procedimiento consiste en emulsionar un polímero fundido para, después, solidificar las gotas, bien con un cambio de temperatura o mediante la eliminación de un solvente, tras lo cual se forma una capa protectora gruesa alrededor del núcleo.

Una vez protegido el cicatrizante en el interior de las cápsulas, el paso siguiente consiste en incorporarlas a un polímero. Las cápsulas resisten bien la cizalladura, los cambios térmicos y otras condiciones que afectan a su proceso de mezcla con la matriz (la base a la que se aplica el refuerzo). Tras haber añadido las cápsulas, han de determinarse las propiedades mecánicas del material resultante, pues su resistencia, tenacidad o elasticidad pueden variar tras la adición de las cápsulas. La efectividad del mecanismo de activación y la capacidad de reparación se evalúan mediante microscopía óptica, espectroscopia infrarroja o de rayos X, o microscopía electrónica de barrido.

Todo proceso de reparación autónoma requiere, al menos, la acción de dos agentes: el cicatrizante y un polimerizador que lo solidifique. En un material capsular, existen varios métodos para evitar que dichas sustancias se mezclen antes de que se produzca el daño. Mientras que el cicatrizante se encuentra siempre en el interior de las cápsulas, el polimerizador puede incorporarse de varias maneras. Una de ellas consiste en esparcirlo a lo largo de todo el volumen del material, un procedimiento que se ha ensayado con compuestos de epoxi reforzados con fibras. Nuestro grupo ha demostrado que los materiales resultantes poseen una alta eficiencia de reparación y una mayor resistencia a la fatiga. En una variante de esta técnica, el polimerizador se recubre con esferas de cera, las cuales lo protegen del entorno hostil de la matriz.

Otro procedimiento se basa en aislar el cicatrizante y el polimerizador en cápsulas separadas. Este método resulta muy útil cuando la reparación requiere más de dos sustancias. Las respectivas cápsulas no tienen por qué ser del mismo tipo, ya que cada sustancia puede reaccionar de modo diferente con la pared del gránulo. Parte de nuestro trabajo en la técnica de cápsulas múltiples se ha aplicado a inhibidores de la corrosión, en los que un cicatrizante resinoso y un catalizador de estaño se encapsulan por separado y se incorporan a un revestimiento de epoxi. La misma técnica se ha utilizado en compuestos laminares autosellantes. Otros grupos han desarrollado métodos similares con diversos agentes y polimerizadores.

Otra posibilidad radica en dotar a la matriz de la capacidad de polimerización, ya sea como una propiedad intrínseca o a modo de respuesta a un estímulo externo. Una de nuestras investigaciones se basó en añadir un exceso de aminas a una matriz de epoxi, gracias a lo cual la polimerización se desencadenaba tras la liberación del cicatrizante. Otras técnicas aprovechan estímulos ambientales, como la oxidación o la evaporación, para provocar la reacción. Por último, uno de los agentes puede encontrarse como una fase separada, disperso en forma de gotas inmiscibles por todo el volumen del material, lo que también induce una capacidad latente de reparación.

REDES VASCULARES

Aunque los cicatrizantes encapsulados poseen un potencial considerable, adolecen de una seria limitación: cada cápsula puede usarse solo una vez, por lo que no permiten más que una reparación en cada zona. Esta restricción ha llevado a diseñar materiales con una estructura inspirada en el sistema vascular de los seres vivos. En sus análogos sintéticos, una red de con-

ductos huecos contiene el cicatrizante, mientras que otro retículo, intercalado pero independiente del anterior, encierra el polimerizador. En este caso, las propiedades mecánicas del material resultante pueden verse afectadas por el tamaño de la red, la rigidez de sus paredes, su adherencia a la matriz, la fracción del volumen total que ocupa o la distribución y uniformidad de los conductos. Al igual que en los sistemas capsulares, también aquí debe evaluarse la eficiencia de los mecanismos de activación del cicatrizado y su capacidad de reparación. Sin embargo, una diferencia fundamental entre ambas técnicas reside en los procesos para fabricar el mecanismo e integrarlo en la matriz.

Al contrario que en la reparación por cápsulas, los sistemas vasculares reciben el cicatrizante después de que la red de capilares ya se haya instalado en el material. Por lo general, la sustancia se inyecta aplicando vacío. La elección del cicatrizante debe tener en cuenta factores como su humectabilidad superficial, viscosidad y reactividad química. Si un agente posee una viscosidad elevada y una reducida capacidad para humedecer (o adherirse a) las superficies, quizá no penetre en la red de manera eficiente o no se transporte ni se libere del modo adecuado en el lugar de la reparación. Y, por supuesto, la estabilidad del conjunto requiere que el cicatrizante y la red vascular sean químicamente compatibles.

Quizá la técnica más sencilla para construir una red vascular consista en emplear fibras de vidrio huecas: su fabricación no presenta grandes dificultades técnicas, resultan compatibles con una gran cantidad de polímeros y, además, el vidrio no reacciona con las sustancias reparadoras más comunes, como las resinas epoxi de dos componentes. Por otro lado, los conductos pueden entrelazarse con facilidad con las fibras de vidrio o carbono que se emplean para reforzar una gran variedad de materiales, pues ambas estructuras poseen formas y tamaños similares. Aunque esta técnica nació con canales de un milímetro de diámetro, hoy su tamaño se ha reducido hasta los 15 micrómetros. Con todo, las fibras de vidrio huecas tienen un inconveniente: su estructura es siempre unidireccional, por lo que no se prestan a la elaboración de redes vasculares complejas.

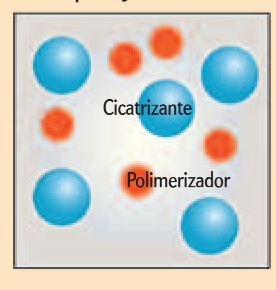
Aumentar la conectividad de la red a dos y tres dimensiones comporta numerosas ventajas. Cada nodo presenta varias conexiones, lo que facilita la circulación del fluido y dota al material de mayores reservas de cicatrizante. Ello no solo permite reparar zonas más extensas, sino que facilita la reposición del agente reparador. Los retículos bidimensionales resultan idóneos para incorporarlos a materiales laminares, ya que entonces la red puede emparedarse entre dos capas sucesivas, sin excesivas repercusiones en la resistencia mecánica del compuesto resultante.

PRIMER MÉTODO

Sistemas capsulares

En los sistemas capsulares, las sustancias reparadoras se encuentran contenidas en microcápsulas dispersas por el seno del material. Difieren entre sí por la manera en la que aíslan el polimerizador (*rojo*) y el cicatrizante (*azul*), las dos sustancias que deben reaccionar para arreglar los desperfectos. Cada cápsula puede usarse solo una vez, por lo que este método no permite más que una única reparación en cada lugar.

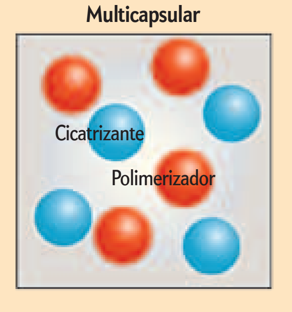
Cápsula y catalizador

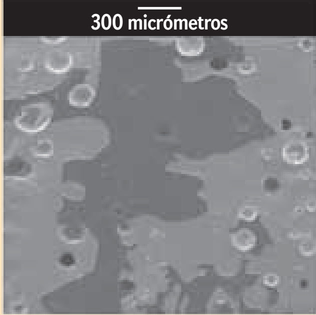




Los mecanismos de cápsulas y catalizador integran el polimerizador (*amarillo*) directamente en el material.

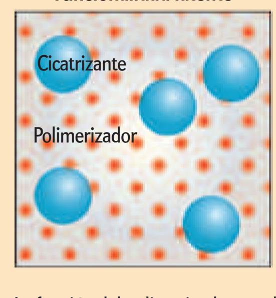
Multicapsular

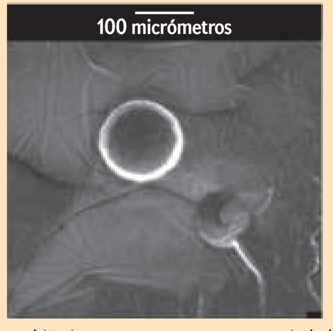




Los sistemas multicapsulares emplean cápsulas de distintos tipos para una y otra sustancia.

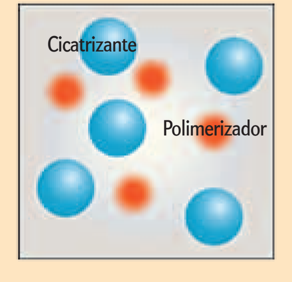
Funcionalidad latente

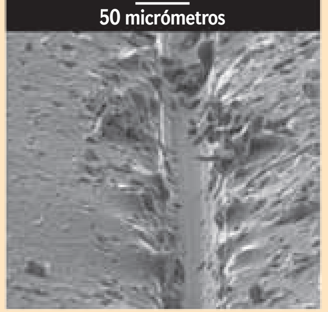




La función del polimerizador puede también incorporarse como una propiedad latente de la matriz del material, la cual reacciona con el cicatrizante cuando este se libera.

Fases separadas



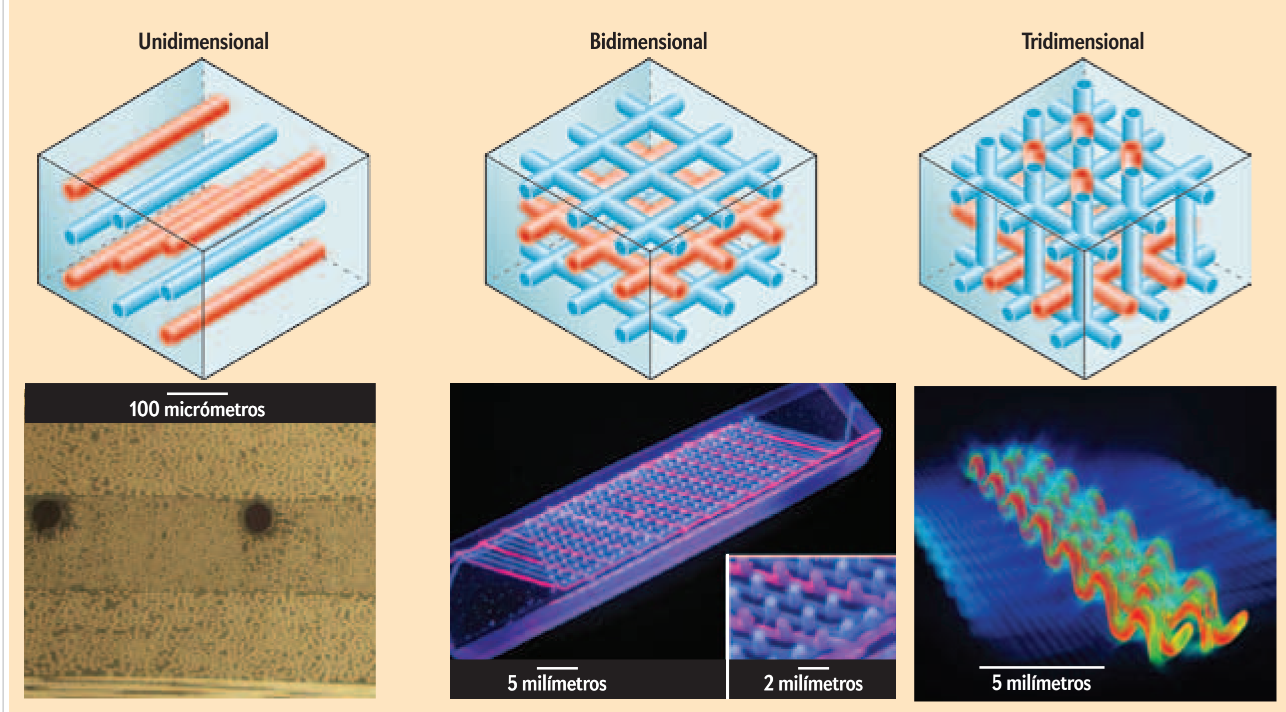


El polimerizador puede también hallarse como una fase separada, en forma de pequeñas gotas dispersas en el seno del material.

SEGUNDO MÉTODO

Sistemas vasculares

En las redes vasculares, el cicatrizante (*azul*) y el polimerizador (*rojo*) se hallan en conductos separados. Cuando se produce un daño, las fibras se rompen y se liberan los agentes cicatrizantes. Estos pueden reponerse desde el exterior, lo que permite varias cicatrizaciones sucesivas en una misma localización.



Las redes unidimensionales pueden fabricarse con fibras de vidrio huecas. La microfotografía electrónica de barrido muestra la vista frontal de una sección de material.

Las redes en dos y tres dimensiones pueden fabricarse gracias al método de «escritura directa» sobre un entramado (*izquierda*) o entretejiendo «fibras expiatorias» con las fibras de refuerzo de un material compuesto (*derecha*).

DE: «A SELF-HEALING CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER FOR AEROSPACE APPLICATIONS», POR G. WILLIAMS EL AL. EN *COMPOSITES PART A*, VOL. 38, PÁG. 1525, 2007 (*red unidimensional*), CON PERMISO DE ELSEVIER; «SELF-HEALING MATERIALS WITH INTERPENETRATING MICROVASCULAR NETWORKS», POR C. J. HANSEN AL. EN *ADVANCED MATERIALS*, VOL. 21, PÁG. 4143, 2009 (*red bidimensional y tridimensional*), CON PERMISO DE JOHN WILEY AND SONS

La técnica más corriente para construir redes en dos y tres dimensiones se conoce como «escritura directa». En primer lugar, se forma un entramado en el interior de un molde, el cual se rellena después con un precursor de polímero. Cuando este se solidifica, se procede a la disolución química del entramado, de manera que lo que sobrevive es la red de conductos huecos en el polímero. Aunque este procedimiento permite controlar en buena medida la geometría de la red, la elección de los materiales de la matriz se encuentra limitada por aquellos que pueden formarse en torno al entramado.

Uno de los últimos avances logrados por nuestro grupo de investigación salva muchas de las limitaciones del método de escritura directa. En un material compuesto se entretejen «fibras expiatorias» que luego se vaporizarán a una temperatura de entre 200 y 240 grados Celsius. Esas fibras se mantienen estructuradas hasta los 180 grados, por lo que pueden integrarse con las otras fibras del compuesto. Mediante un proceso de tejido tridimensional, se crea una preestructura reticular que luego se infiltra con una matriz de polímero, la cual se cura por calentamiento. Los puntos del tejido en los que se cruzan las fibras expiatorias constituirán las conexiones entre los conductos vasculares del material una vez terminado. A diferencia de la escritura directa, la cual resulta difícil de aplicar a gran escala para su comercialización, la técnica con fibras expiatorias puede llevarse a cabo con métodos rutinarios. En particular, hemos creado conductos de hasta un metro de longitud y con una complejidad vascular considerable.

Varios miembros de nuestro grupo han logrado otros avances en el desarrollo de redes multidimensionales. A fin de obtener redes tridimensionales más eficientes, hemos recurrido a modelos basados en algoritmos genéticos para optimizar la fiabilidad, el volumen de la red y el diámetro de los conductos. Asimismo, hemos empleado la técnica de escritura directa para imitar la estructura y funcionalidad del tejido epidérmico. En este caso, un revestimiento de epoxi frágil que contiene un polimerizador se deposita sobre un sustrato de epoxi flexible, este último provisto de un retículo tridimensional formado por conductos de unos 200 micrómetros de diámetro. Las grietas superficiales en el revestimiento liberaban el cicatrizante del sistema vascular subyacente. La red podía rellenarse y las muestras pudieron repararse hasta en 7 ocasiones. Después, para ampliar el número de ciclos de restauración, introdujimos cicatrizantes y polimerizadores en dos redes separadas, con lo cual logramos hasta 16 reparaciones. Al refinar los métodos de escritura directa para crear redes complejas y aisladas, aunque interpenetradas, hemos conseguido más de 30 ciclos restauradores en el recubrimiento. Los avances más recientes en los diseños vasculares multidimensionales permiten también varias reparaciones sucesivas de los daños en el interior de la matriz.

REPARACIÓN SIN CICATRIZANTES

Uno de los mayores inconvenientes de los sistemas capsulares y vasculares se debe a que su incorporación supone añadir material (y volumen) a la matriz a la que se desea dotar de la función cicatrizadora. Una solución más elegante consiste en inducir dicha propiedad directamente en las propiedades químicas del material. Esta técnica se basa en la reversibilidad inherente a los enlaces químicos de la matriz de polímero. Algunos mecanismos incluyen reacciones térmicas reversibles, puentes de hidrógeno, acoplamiento de ionómeros, cambios de fase de termoplásticos licuables dispersos o difusión molecular.

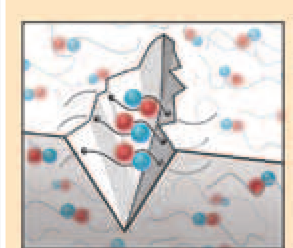
El diseño de tales materiales puede resultar menos complicado que el de los sistemas capsulares o vasculares, puesto que los cicatrizantes ya no deben integrarse en la matriz ni aislarse, y tampoco existen problemas de compatibilidad. En este caso, sin embargo, la dificultad principal reside en que el material ha de gozar de las propiedades mecánicas, químicas u ópticas necesarias para su pretendido uso final. Además, la autorreparación intrínseca ofrece mejores resultados cuando la zona dañada es de tamaño reducido, ya que los enlaces no podrán restablecerse si los bordes de una grieta se encuentran demasiado separados.

Un polímero se compone de una sucesión de unidades más sencillas llamadas monómeros. Una manera de implementar la facultad de reparación intrínseca consiste en aprovechar la capacidad inherente de estos materiales para pasar, de manera reversible, de una estructura formada por monómeros a otra de polímeros reticulados. Para ello, necesitan un aporte externo de energía, como la aplicación de luz o calor.

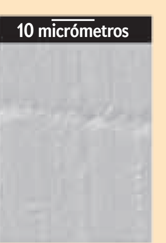
TERCER MÉTODO

Reparación intrínseca

Los sistemas de reparación intrínseca se basan en la existencia de ciertos procesos químicos reversibles para recomponer los enlaces químicos en los polímeros y volver a entretejer sus cadenas. La reparación puede activarse por aplicación de luz o calor. Las microfotografías reproducen una muestra dañada y la cicatrización obtenida con distintos procedimientos de cicatrización intrínseca.

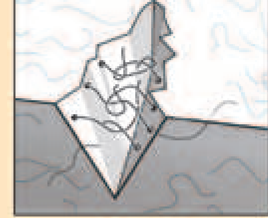

Enlaces reversibles

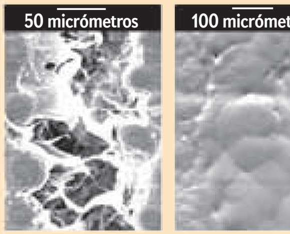


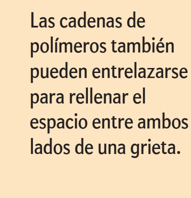


El método de enlaces reversibles aprovecha la capacidad de los polímeros para reorganizarse en términos de sus componentes más simples y reconstruir sus enlaces.

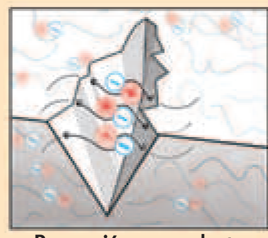


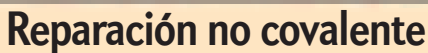

Entrelazamiento de cadenas

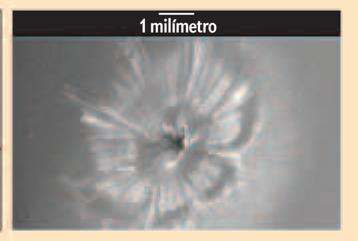




Las cadenas de polímeros también pueden entrelazarse para rellenar el espacio entre ambos lados de una grieta.




Reparación no covalente



La cicatrización no covalente opera por medio de puentes de hidrógeno reversibles o procesos de agrupamiento iónico, que en los polímeros se manifiestan en forma de entrecruzamientos reversibles.

Otro procedimiento se basa en incorporar un aditivo termoplástico licuable. Cuando este se funde, se dispersa por el interior de las grietas y se traba con el material circundante de la matriz. Además, algunos aditivos aumentan de volumen cuando se calientan, con lo que rellenan la zona dañada. Tales reacciones pueden tener lugar varias veces, tras las cuales se ha comprobado que los materiales continúan soportando bien las cargas.

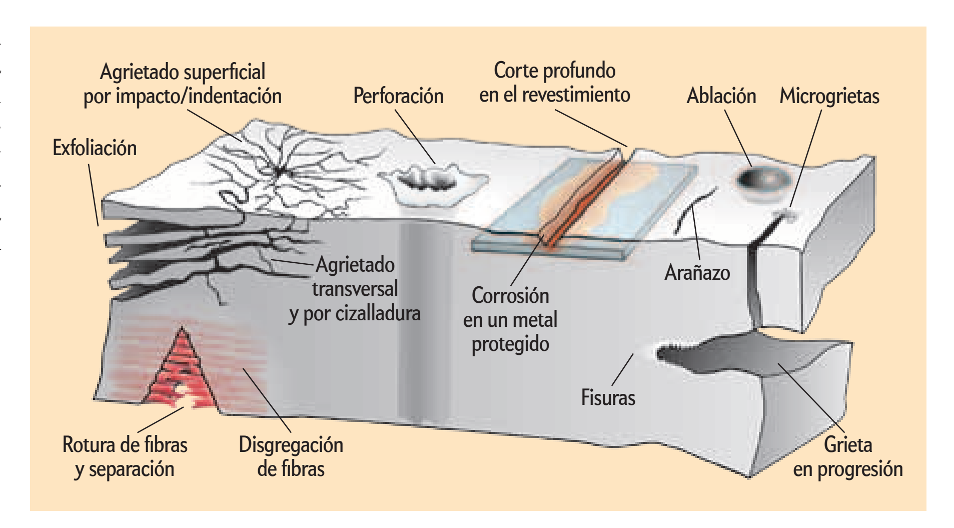
En ocasiones puede dotarse de carga eléctrica a ciertos segmentos del polímero, denominados ionómeros. Si se los expone al calor o la radiación ultravioleta, puede lograrse que dichos segmentos se agrupen y llenen el espacio que media entre los márgenes de una grieta. Se ha demostrado que, cuando esos materiales ionoméricos son atravesados por un proyectil, el calor liberado en la perforación basta para desencadenar el mecanismo de autorreparación. Es más, el tiempo que el orificio tarda en cerrarse resulta casi idéntico al que necesita la bala para abrir el agujero.

Los polímeros pueden también diseñarse para que, por medio de puentes de hidrógeno múltiples, den lugar a fuertes asociaciones tanto en los grupos de sus extremos como en los grupos laterales de sus cadenas. Se ha comprobado que esos materiales gomosos vuelven a formar puentes de hidrógeno en las zonas dañadas una vez que las piezas rotas se ponen otra vez en contacto. Asimismo, algunos pueden adquirir una capacidad intrínseca de cicatrización por medio de procesos de difusión molecular reforzada, la cual favorece el desplazamiento y el tejido de los polímeros entre ambos lados de una grieta. Se ha comprobado que dicha técnica inhibe la corrosión del aluminio y el zinc. El aumento de los niveles de pH que acompaña a la corrosión catódica promueve la movilidad de los componentes de un revestimiento, lo que desencadena la autorreparación.

APLICACIONES

En un caso ideal, un material se recompondría a la misma velocidad a la que se produce el daño. Aunque, bajo ciertas condiciones, este objetivo se ha logrado con algunos materiales, la mayoría aún se halla lejos de semejante hito. Por otro lado, la eficacia de la reparación se calcula como el cociente entre las propiedades del material restaurado y las del original. Cualquier

Cada tipo de daño puede requerir un método de cicatrización distinto. La indentación, el impacto, la exposición a ambientes corrosivos, las perforaciones balísticas, el rayado superficial y la fatiga pueden producir daños de diversa índole. La clase de material y la fatiga a la que se le somete determinan las roturas más habituales.



proceso de reparación persigue una eficacia del 100 por cien, y cada una de las técnicas que hemos visto hasta ahora cuenta con al menos un ejemplo de éxito. Las eficacias registradas en distintos materiales oscilan entre el 20 y el 100 por ciento. En algunos casos, de hecho, las zonas restauradas resultaron ser más tenaces que el material original.

Un polímero o un compuesto puede dañarse de varias maneras. Entre ellas podemos mencionar el impacto, la fatiga, la fractura, la perforación y la corrosión, cada una de las cuales incluye modos más específicos. Un impacto, por ejemplo, puede crear grietas superficiales, exfoliación subsuperficial, grietas en la matriz o grietas laminares transversales (en las que se generan nuevas grietas que se extienden entre las ya existentes). Estos tipos de daño no afectan solo a las propiedades mecánicas del material, sino también a su capacidad para actuar como barrera. En particular, se ha estudiado la restauración de las propiedades del material frente a fracturas, la recuperación de su capacidad para contener líquidos y gases, o la de proteger un sustrato de la corrosión.

A fin de comprobar la reparación de las fracturas bajo condiciones controladas, se someten muestras a toda clase de impactos, doblados, tracciones y desgarros. En 2001, nuestro grupo logró el primer ejemplo de reparación autónoma en un epoxi provisto de un sistema capsular. El material recuperó el 75 por ciento de las propiedades originales. Descubrimos, además, que las microcápsulas aumentaban la tenacidad del epoxi no dañado, pues las esferas absorbían energía e impedían que las grietas se propagasen.

Al examinar la reparación de fracturas en compuestos reforzados con fibra, hallamos que la incorporación de microcápsulas de mayor tamaño que las fibras de refuerzo engrosaba las zonas donde las capas se laminaban, lo que producía una disminución inicial de la tenacidad. Sin embargo, tras 48 horas de reparación a temperatura ambiente, las muestras antes fracturadas mostraban una eficacia de reparación del 40 por ciento, valor que se incrementaba hasta un 80 por ciento cuando se recomponían a una temperatura de 80 grados Celsius. En esos materiales, la recuperación completa de la tenacidad parece verse limitada cuando hay pocas fibras que atraviesan la zona dañada y cuando la distribución de cicatrizante no guarda regularidad en el plano de fractura.

En un estudio reciente, nuestro grupo dispuso sistemas capsulares directamente sobre la superficie de las fibras de refuerzo de vidrio, a fin de atacar y reparar los daños que afectaban a la trabazón entre el refuerzo y la matriz del material. Los resultados preliminares mostraron que podía conseguirse una recuperación de hasta el 50 por ciento en la unión entre las fibras de la matriz. Compañeros nuestros de la Universidad de California en Los Ángeles han estudiado las propiedades de materiales reforzados con fibras de carbono, los cuales contenían una matriz de autorreparación intrínseca capaz de efectuar reacciones térmicas reversibles. Hallaron que la recuperación de las propiedades del material ascendía al 90 por ciento para tres ciclos cuando las microgrietas se calentaban hasta 150 grados durante un minuto.

Otro experimento sobre la recomposición de fracturas consiste en producir un corte en la superficie de una muestra de polímero, para, después, evaluar con medios ópticos tanto el daño por rayadura como el cierre de la grieta. En varios estudios con polímeros de reparación intrínseca, se practicaron cortes con una navaja de afeitar, los cuales cicatrizaron tras realinear los trozos durante 10 o 15 minutos a temperatura ambiente. Una vez restauradas, las muestras se sometieron a plegados y deformaciones a fin de comprobar la reapertura de las grietas. Algunas se mostraron más débiles que sus originales, pero un gran número de ellas no exhibieron fisuras en las zonas cicatrizadas. Otros estudios del mismo tipo realizados con desgarros en lugar de cortes arrojaron resultados similares.

La fatiga, uno de los fallos más comunes en los materiales estructurales, plantea sus propios problemas al diseño de materiales de reparación autónoma. La carga que sufre un material a consecuencia de la fatiga depende de numerosas variables, como la amplitud y la frecuencia de los esfuerzos. Hasta hoy, solo un reducido número de estudios se ha ocupado de los daños por fatiga. Nuestro grupo, entre otros, ha investigado la relación entre la velocidad en la progresión del daño, la rapidez de la cicatrización y la prolongación de la vida del material. Cuando el deterioro se produce a mayor velocidad que la reparación, aquel se acumula y el material acaba fallando. Para contrarrestar este efecto, quizá sea necesario aumentar la velocidad de las reacciones químicas, o permitir períodos de reposo más prolongados. Sin embargo, cuando las velocidades de daño y reparación se igualan, se registra un aumento considerable en la vida del material.

Los impactos pueden, asimismo, producir grandes daños en todo el volumen y provocar varios tipos de fallo, como perforaciones, exfoliaciones o agrietamiento mixto. Hasta ahora, los experimentos se han centrado en cuantificar la recuperación de

DE: «SELF-HEALING POLYMERS AND COMPOSITES», POR B. J. BLAISZIK ET AL. EN *ANNUAL REVIEW OF MATERIALS RESEARCH*, VOL. 40, PÁGS. 179-211, 2010

la resistencia a la compresión tras un impacto a baja velocidad. Nuestros colegas de la Universidad de Bristol han investigado con un material de epoxi reforzado con fibra de carbono y dotado de redes de vidrio huecas rellenas de cicatrizante. Tras someter las muestras a unas energías de impacto de hasta 3 julios, hallaron que el sistema de fibras huecas absorbía una gran cantidad de energía al fracturarse como consecuencia del impacto, lo que aumentaba la resistencia a la compresión en un 13 por ciento. Unas temperaturas elevadas facilitaban de manera notable la cicatrización del daño; sin embargo, el material se mostraba sensible a la uniformidad de los conductos en el seno del laminado.

Los estudios de los daños provocados por impacto en los sistemas de reparación capsular han mostrado resultados dispares. Expertos de la Universidad de Zhongshan experimentaron con compuestos reforzados con fibra de vidrio tejida. Para energías de impacto de entre 1,5 y 3,5 julios, midieron eficacias de reparación cercanas al 100 por cien en el caso de impactos de 1,5 julios, pero solo del 20 por ciento en los de 3,5 julios. Sin embargo, cuando nuestro grupo probó un material similar frente a energías de impacto de entre 13 y 45 julios, halló, pese al extenso agrietamiento de la muestra, unas eficacias próximas al 100 por cien para impactos de hasta 20 julios, las cuales decrecían conforme aumentaba el volumen del daño para energías mayores.

Otra clase de impacto más suave, la indentación, puede provocar daños más controlados. El grupo de la Universidad de Bristol ha estudiado sus efectos en compuestos de epoxi con fibras de vidrio huecas para estudiar la liberación y el transporte del cicatrizante, las prestaciones mecánicas y el envejecimiento del material.

Además de la de muestras macizas, nuestro grupo también ha estudiado la capacidad de autorreparación de otros materiales poliméricos, como cámaras de pared fina o paneles estratiformes, empleados para contener el flujo de gases y líquidos. Hemos examinado cámaras de pared fina dotadas de un sistema de microcápsulas emparedado entre dos capas de nailon revestidas de epoxi. Las cámaras se perforaban con agujas hipodérmicas para, después, dejarlas cicatrizar durante 24 horas. La eficacia de reparación en el cicatrizado de los orificios variaba entre el 40 y el 100 por ciento, en función del tamaño de la cápsula y su concentración.

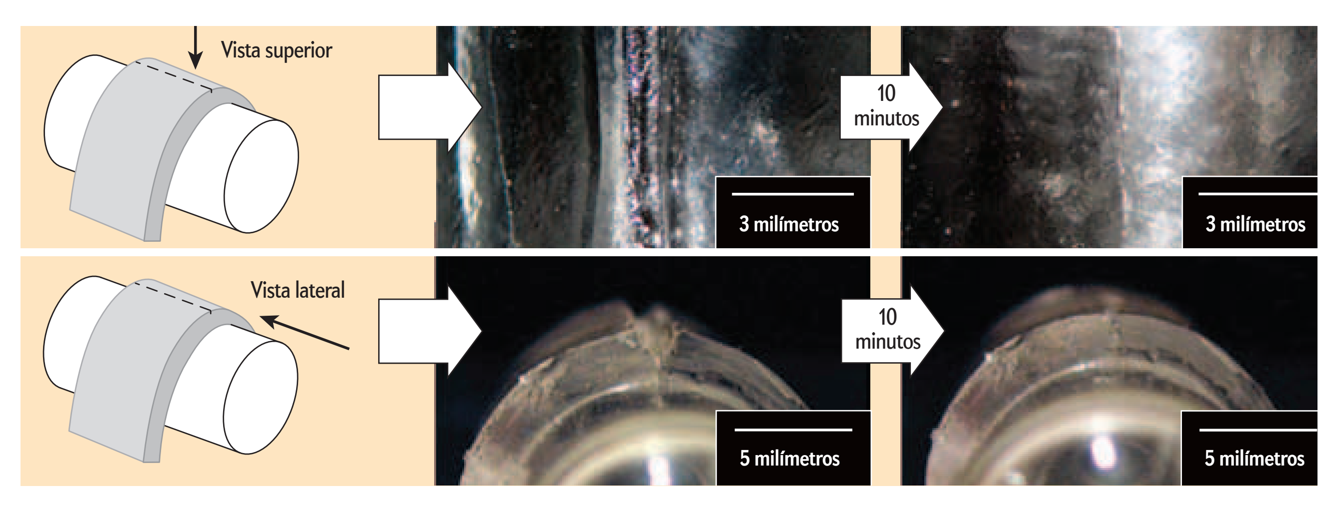
Por último, los revestimientos anticorrosión constituyen una protección clave para las piezas metálicas que deban trabajar en ambientes salinos o húmedos. Estas barreras pierden su cualidad protectora cuando se rayan o se erosionan, lo que las convierte en un objetivo de gran interés para los sistemas de reparación autónoma. En los experimentos se realizan cortes en el revestimiento, para exponerlo después a la acción del agua salada y, en ocasiones, a la luz ultravioleta. La recuperación se determina por medio de la corrosión visible en los cortes o por la conductancia eléctrica de la superficie: la impedancia del revestimiento intacto debe superar a la del metal desnudo.

Varios grupos han estudiado la resistencia a la corrosión de sistemas de revestimiento capsulares que contenían aceite de linaza, aceite alcanforado y aceite de tung, entre otros. En nuestros laboratorios, hemos registrado prestaciones notables en los revestimientos de epoxi y en aquellos con base de vinilo dotados de sistemas capsulares y expuestos a agua salina. Los sistemas de reparación intrínseca se muestran muy adecuados para estas protecciones de barrera, ya que en ellos se potencia el cicatrizado de pequeños defectos. Varios grupos han referido una desaparición total de la corrosión gracias al uso de esta técnica.

MATERIALES LONGEVOS

El campo emergente de los materiales con capacidad de restauración autónoma ha realizado grandes progresos durante el último decenio. Aunque aún persisten no pocas dificultades técnicas, se espera que los próximos avances desemboquen en el descubrimiento de nuevos procesos químicos reparadores, caracterizados por una estabilidad, actividad y velocidad de cicatrización mayores. En todo caso, cómo se comportarán esos materiales cuando se expongan de manera prolongada a entornos hostiles continúa siendo un tema abierto. La principal utilidad de los sistemas de reparación autónoma radicará en la lucha contra la fatiga y los daños incidentales o periódicos. Hasta ahora, sin embargo, la gran mayoría de las investigaciones se ha centrado en la respuesta a las fracturas estáticas, no en los aspectos dinámicos de la reparación bajo condiciones de fatiga.

Cabe esperar que las aplicaciones a gran escala no incorporen sistemas de cicatrización en todo el volumen del material, sino componentes localizados, a fin de optimizar los costes, la



Un polímero autorreparable ha sido sometido a un corte y situado sobre un cilindro (*izquierda*) a fin de observar el daño (*centro*) y la cicatrización (*derecha*).

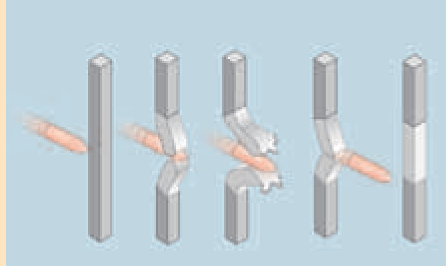
eficiencia y los posibles efectos perjudiciales sobre las propiedades globales del material. Con toda probabilidad, el primer éxito comercial de estas técnicas se dará en el campo de los revestimientos, pues estos abundan en todo tipo de aplicaciones industriales y, en comparación con los componentes estructurales, solo se les exigen modestas prestaciones mecánicas.

APLICACIONES

Velocidad y calidad de reparación

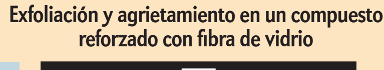
Todo proceso de reparación autónoma aspira a lograr una velocidad de cicatrización que iguale a aquella a la que se produce el daño. Además, se persigue que las propiedades de resistencia mecánica del material reparado igualen a las del original. Si bien en la mayoría de los casos tales objetivos quedan aún lejos, cada una de las técnicas expuestas aquí cuenta con al menos un ejemplo de éxito.

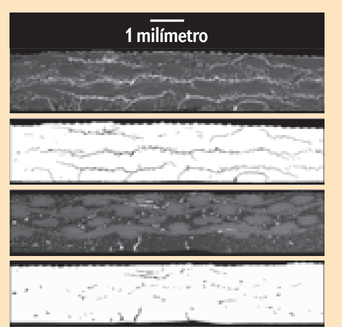
Perforación balística de un polímero ionomérico



Cuando un proyectil atraviesa un polímero dotado de un sistema de reparación ionomérica, la sustancia fundida por el calor del impacto retorna con gran rapidez al lugar original. El flujo viscoso y la interdifusión de las superficies fundidas sellan las grietas restantes.

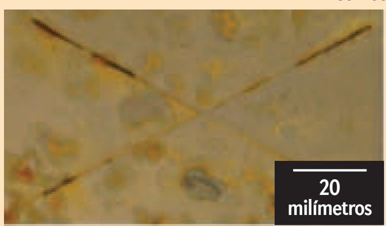
Exfoliación y agrietamiento en un compuesto reforzado con fibra de vidrio

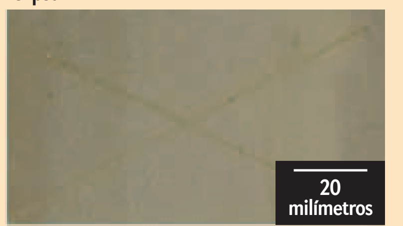


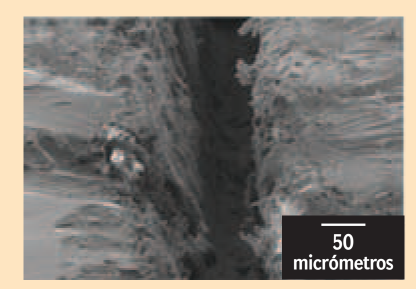


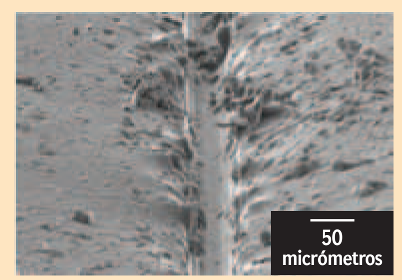
Un compuesto reforzado con fibra de vidrio ha sido dañado por indentación. Las grietas que se aprecian en la sección transversal de la muestra de control (*arriba*) se ven muy suprimidas tras un proceso de reparación por cápsulas (*abajo*).

Anticorrosión capsular









Una muestra de acero recubierta de epoxi ha sido rayada y examinada después ópticamente (*imágenes superiores*) y con microscopía electrónica de barrido (*imágenes inferiores*). Las imágenes permiten comparar los efectos de la corrosión en una muestra de control (*izquierda*) y en una tratada con un sistema de reparación autónoma (*derecha*).

Pero, aparte de las mecánicas, otras propiedades pueden también hallarse en el punto de mira de la cicatrización sintética. La recuperación de la conductividad, por ejemplo, rendiría grandes beneficios en microelectrónica y en las técnicas de almacenamiento de energía. Los circuitos informáticos averiados se repararían a sí mismos y no necesitarían reemplazos. Nuestro grupo, entre otros, ha sintetizado polímeros organometálicos con propiedades de conductividad similares a las de los semiconductores, los cuales se reparan con aplicación de calor. En fecha reciente hemos demostrado la recuperación automática de la conductividad mediante la liberación de materiales muy conductores contenidos en microcápsulas.

La restauración de las propiedades ópticas podría constituir también un camino fructífero en este campo. El índice de refracción en una grieta difiere de el del resto del material, lo que deteriora sus propiedades de transparencia. La capacidad de un sistema capsular o vascular para incorporar un polímero con el índice de refracción adecuado en el lugar preciso podría atenuar dicho efecto.

Con independencia del tipo de material, cabe esperar que los sistemas de reparación autónoma aumenten la seguridad y funcionalidad de los productos y rebajen los costes de mantenimiento a lo largo de su vida útil. Entre las aplicaciones potenciales se encuentran baterías más seguras, revestimientos protectores de automóviles, neumáticos, tejidos y productos electrónicos. Pero ¿cabe la posibilidad de ir más allá de la cicatrización? Si tomamos de nuevo a los seres vivos como fuente de inspiración, observaremos que los huesos se regeneran y remodelan como respuesta a los esfuerzos y otros estímulos. Es posible que, en el futuro, los materiales que hoy pueden repararse solos logren reaccionar de un modo más complejo y lleguen a remodelarse a sí mismos.

Este artículo es una adaptación de «Self-healing polymers and composites», por B. J. Blaiszik et al. en *Annual Review of Materials Research*, vol. 40, págs. 179-211, 2010.

PARA SABER MÁS

Autonomic healing of polymer composites. S. R. White et al. en *Nature*, vol. 409, n.º 6822, págs. 794-797, 2001.

Self-healing structural composite materials. M. R. Kessler, N. R. Sottos y S. R. White en *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, n.º 8, págs. 743-753, 2003.

Self-healing materials with microvascular networks. K. S. Toohey et al. en *Nature Materials*, vol. 6, n.º 8, págs. 581-585, 2007.

Self healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science. S. van der Zwaag. Springer Verlag. Dordrecht, 2007.

Self-healing materials: A review. R. P. Wool en *Soft Matter*, vol. 4, n.º 3, págs. 400-418; 2008.


Prensa Científica, S.A.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



La insoportable necesidad del ser

¿Existimos de manera contingente o necesaria?

Parece obvio que existimos de manera temporal y contingente. De manera temporal, porque no siempre hemos existido ni siempre existiremos; de manera contingente, porque todo parece indicar que bien podríamos no haber existido jamás.

Sin embargo, algunos argumentos permiten demostrar precisamente lo contrario. Tal vez no suponga mucho consuelo para usted, pero cuando combinamos ciertos principios lógicos en apariencia indiscutibles con algunos principios modales muy plausibles, resulta posible *demostrar* que todo existe de manera necesaria. Más aún: con una ligera variación de los mismos argumentos, podríamos demostrar que todo existe de manera eterna. ¡Siempre hemos existido y siempre existiremos!

¿Se siente usted mejor? Probablemente no. A continuación intentaremos averiguar qué es exactamente lo que demuestra la clase de razonamientos a los que acabamos de aludir.

Comencemos por uno de ellos. Supongamos por un momento que la torre Eiffel no existiese. En tal caso, sería cierto que la torre Eiffel no existe. Por tanto:

(1) Es necesario que, si la torre Eiffel no existe, sea cierto que la torre Eiffel no existe.

Pero lo único que puede ser verdadero o falso es una proposición. En consecuencia, si es cierto que la torre Eiffel no existe, entonces debe existir la proposición que afirma que la torre Eiffel no existe:

(2) Es necesario que, si es cierto que la torre Eiffel no existe, exista la proposición que afirma que la torre Eiffel no existe.

Sin embargo, una proposición que afirma que la torre Eiffel no existe nos está diciendo algo sobre la torre Eiffel. Pero ¿cómo podría existir una proposición que dijese algo sobre un objeto si este no existe? Se sigue, por tanto:

(3) Es necesario que, si existe la proposición que afirma que la torre Eiffel no existe, exista la torre Eiffel.

Al encadenar el antecedente y el consecuente de las tres afirmaciones anteriores podemos concluir que:

(4) Es necesario que, si la torre Eiffel no existe, exista la torre Eiffel.

A partir de la suposición de que la torre Eiffel no existe hemos derivado la necesidad de una contradicción. La conclusión es inevitable:

(5) Es necesario que exista la torre Eiffel.

Tal vez resulte posible rebatir el argumento anterior negando alguno de sus pasos. Puede que Zeus no exista sin que para ello deba existir la proposición que afirma que no existe. O tal vez la proposición exista sin que el mismo Zeus lo haga: quizá sea posible que algunas proposiciones digan algo sobre objetos que carecen de existencia. Cada una de las opciones anteriores acarrea un precio, pero puede que sea uno que debamos pagar a fin de evitar una conclusión tan extravagante como la que acabamos de deducir.

Cuantificadores y lógica modal

En lugar de explorar cada una de las opciones anteriores, analicemos ahora un segundo argumento que parece conducir a la misma conclusión.

En lógica empleamos los símbolos $\forall$, $\exists$, y $\rightarrow$ para traducir las expresiones del lenguaje natural «para todo», «existe» y «si... entonces...» (implicación), respectivamente. Disponemos, además, de principios fundamentales que regulan las propiedades de estas expresiones cuando forman parte de enunciados complejos. Uno de ellos es el *principio de instanciación universal*, el cual podemos simbolizar por medio del siguiente esquema:

(IU) $\forall x$ ...x... $\rightarrow$ ...y... .

Aquí ...x... simboliza un enunciado que habla del objeto x. Traducido al lenguaje natural, el principio de instanciación universal nos dice que «si todo objeto x es tal que ...x..., entonces ...y...», donde ...y... es el enunciado que resulta al reemplazar en ...x... toda ocurrencia libre de la variable x por la variable y. (Decimos que x aparece *libre* cuando lo hace sin estar ligado a ningún cuantificador: $\forall x$ o $\exists x$.) Por ejemplo, si todo objeto ocupa una región espaciotemporal, entonces y ocupa una región espaciotemporal con independencia de qué objeto sea y.

Otro principio que regula la interacción entre el cuantificador universal y el condicional es el que nos permite *generalizar*:

(GU) ...y... $\rightarrow$ $\forall x$ ...x... ,

donde ...x... es el enunciado que resulta al reemplazar por x toda ocurrencia libre de la variable y en ...y... . El significado de este esquema es el siguiente: supongamos que podemos demostrar que y satisface cierta condición ...y..., sin importar qué valor escojamos para la variable y; en tal caso, cabe concluir que todo objeto satisface dicha condición. En un sistema formal podríamos demostrar, por ejemplo, que $y = y$ con independencia del valor de y. Por tanto, a partir de la instancia correspondiente de GU, podríamos deducir que $\forall x\ x = x$.

Por otro lado, la *lógica modal* trata de sistematizar la clase de verdades lógicas a las que podemos llegar cuando razonamos acerca de qué enunciados son necesarios y cuáles son meras posibilidades. Para ello, incorpora dos nuevos símbolos, Nec A y Pos A, los cuales se leen como «es necesario que A» y «es posible que A», respectivamente.

A partir de la heurística de mundos posibles podemos interpretar las verdades de la lógica modal como aquellas que son verdaderas en todo mundo posible. Para deducir verdades lógicas, el procedimiento habitual consiste en especificar una serie de axiomas y reglas de inferencia, y analizar después las consecuencias que se derivan de ellos. Dos axiomas comunes en lógica modal son los siguientes:

(L) *Todo teorema de la lógica clásica es un teorema de la lógica modal*.

(K) Nec $(A \rightarrow B) \rightarrow$ (Nec $A \rightarrow$ Nec B).

El primero de ellos se basa en la convicción de que todo teorema de la lógica clásica debe ser cierto en todo mundo posible, por lo que tales teoremas deben continuar siendo verdaderos también en lógica modal.

El segundo nos dice que, si una implicación es necesaria, entonces la necesidad del antecedente implica la necesidad del consecuente. Podemos motivar este principio a partir de la heurística de mundos posibles: por hipótesis, tenemos que es necesario que «si *A*, entonces *B*», lo cual implica que la afirmación «si *A*, entonces *B*» es cierta en cualquier mundo posible. Pero, si también *A* es necesario, entonces cualquier mundo posible es uno en el que tanto *A* como «si *A*, entonces *B*» son ciertos. En consecuencia, *B* ha de ser verdadero en todos ellos y, por tanto, necesario.

Por otra parte, dos reglas de inferencia básicas son las siguientes:

(MP) *Si A es un teorema y* $A \rightarrow B$ *es un teorema, entonces B es un teorema*.

(RN) *Si A es un teorema, entonces* Nec *A es un teorema*.

La primera regla se conoce como *modus ponens* y proviene de la lógica clásica. La segunda, denominada *regla de necesitación*, merece comentario aparte. Podemos motivarla observando que, si *A* es un teorema, entonces debe ser cierto en todo mundo posible. Pero si *A* es cierto en todo mundo posible, entonces Nec *A* (que viene a decir que *A* es cierto en todo mundo posible) es también cierto en todo mundo posible, con lo cual podemos tratarlo como un teorema.

La fórmula de Barcan

Una de las fórmulas más célebres de la lógica modal con cuantificadores es la *fórmula de Barcan*, que debe su nombre a Ruth Barcan Marcus, una de las investigadoras pioneras en lógica modal con cuantificadores que, tristemente, nos dejó hace apenas unos meses tras más de cincuenta años de carrera profesional. Su fórmula es la siguiente:

(B) $\forall x$ (Nec ...x...) $\rightarrow$ Nec ($\forall x$ ...x...) .

Esta expresión parece más inocente de lo que realmente es: por ejemplo, implica que, si todo objeto es necesariamente un objeto físico, entonces, *necesariamente*, todo objeto ha de ser un objeto físico. El problema reside en que podríamos pensar que, aunque admitamos que nada de lo que existe en nuestro mundo pueda hacerlo sin ser un objeto físico, ello no tendría por qué impedir que hubiese mundos posibles en los que existiesen espíritus inmateriales carentes de sustrato físico.

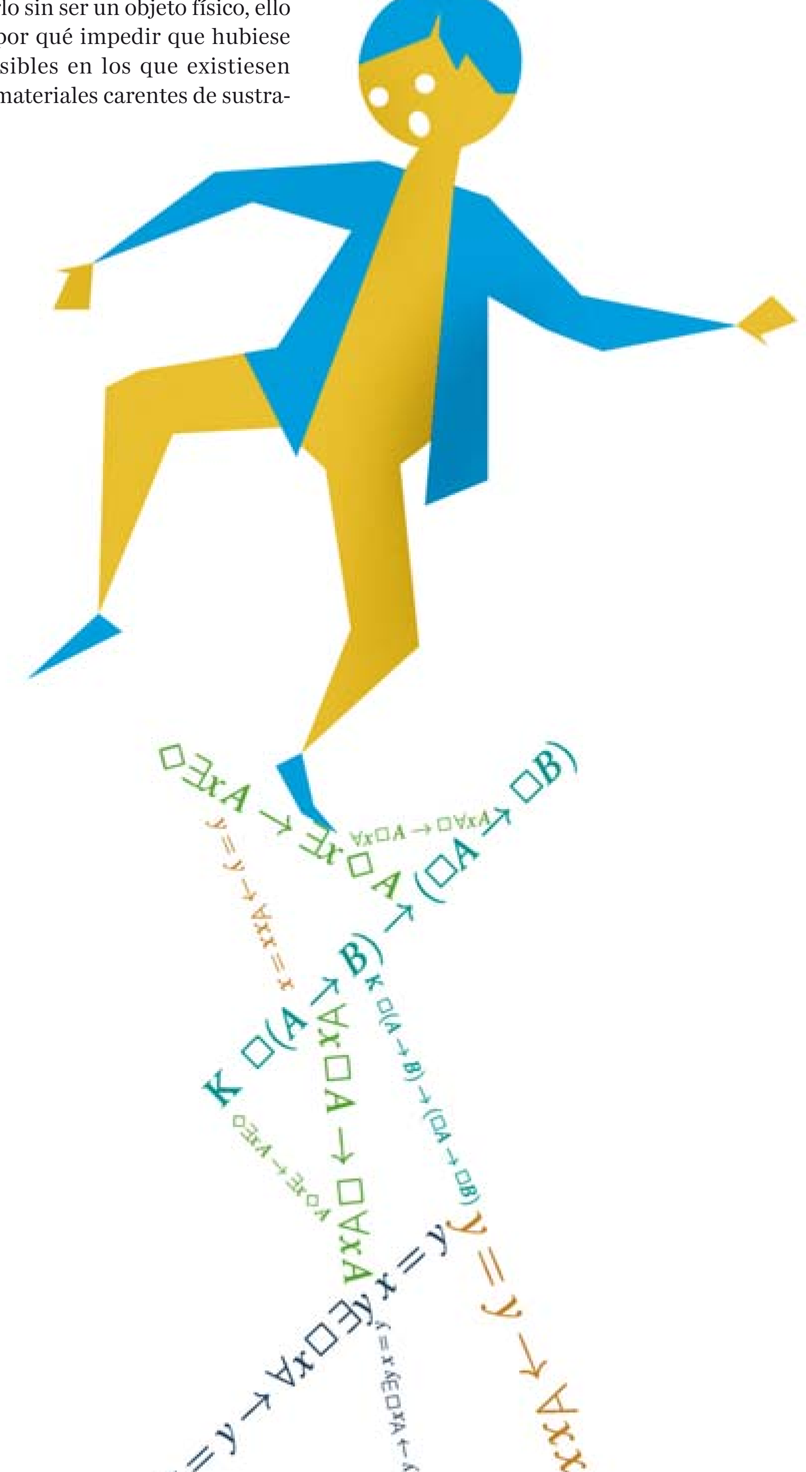
Otra particularidad de la lógica modal con cuantificadores estriba en que nos permite derivar la *inversa* de la fórmula de Barcan:

(IB) Nec ($\forall x$ ...x...) $\rightarrow \forall x$ (Nec ...x...) .

Para demostrarlo, comencemos por lo siguiente:

(1) $\forall x$ ...x... $\rightarrow$ ...x... ,

lo cual no es más que el principio de instanciación universal. El siguiente paso consiste en aplicar a (1) la regla de nece-



DANIEL UZQUIANO



sitación (RN) de la lógica modal, tras lo cual podemos concluir que:

(2) Nec ($\forall x$ ...x... → ...x...) .

Ahora podemos escribir el axioma K de la lógica modal para el caso particular en el que el antecedente es (2):

(3) Nec ($\forall x$ ...x... → ...x...) →
(Nec ($\forall x$ ...x...) → Nec ...x...)

y, por *modus ponens* con (2) y (3):

(4) Nec ($\forall x$ ...x...) → Nec ...x... .

Ahora bien, el principio de generalización universal nos permite escribir:

(5) Nec ...x... → $\forall x$ (Nec ...x...) .

Por último, al encadenar (4) y (5) obtendremos que:

(IB) Nec ($\forall x$ ...x...) → $\forall x$ (Nec ...x...) ;

es decir, la inversa de la fórmula de Barcan. Esta última nos dice que, si es necesario que todo objeto satisfaga A, entonces todo objeto es tal que *necesariamente* satisface A. En consecuencia, dado que es necesario que todo objeto sea idéntico a sí mismo, todo objeto es tal que es necesariamente idéntico a sí mismo.

Existencia necesaria

En el marco de la lógica clásica, la proposición de que un objeto x existe suele expresarse de la siguiente manera:

(1) $\exists y \; x = y$,

ya que, si existe x, es porque existe algún objeto idéntico a x. Ahora bien, no es difícil demostrar el siguiente teorema:

(2) $\forall x \, (\exists y \; x = y)$.

Todo objeto que existe es idéntico a sí mismo; por tanto, todo objeto que existe ha de ser idéntico a algo. Pero ahora podemos aplicar la regla de necesitación:

(3) Nec ($\forall x \, (\exists y \; x = y)$) ;

o, dicho de otro modo, que es necesario que todo objeto que existe sea idéntico a algún objeto. Sin embargo, el inverso de la fórmula de Barcan (IB) aplicado a la cláusula (3) nos dice que:

(4) Nec ($\forall x \, (\exists y \; x = y)$) →
$\forall x$ (Nec ($\exists y \; x = y$)) .

Por último, a partir de (3) y (4) tenemos que:

(5) $\forall x$ (Nec ($\exists y \; x = y$)) .

Esta conclusión nos dice que todo objeto que existe es *necesariamente* idéntico a algún objeto. Pero eso solo puede significar que todo objeto existe necesariamente: ¿cómo, si no, iba un objeto a ser idéntico a otro que sí existe? La conclusión parece ineludible: no solo los números existen de manera necesaria, todo lo que existe existe necesariamente.

La reacción más habitual entre los expertos ante semejante conclusión suele ser la de reformar la lógica. Muchos han querido extraer la lección de que, si deseamos razonar en un lenguaje dotado de cuantificadores como «todo» o «algún» y operadores modales como «es necesario que» o «es posible que», hemos de extremar al máximo las precauciones a la hora de formular los axiomas que gobiernan el uso de los cuantificadores, pues los axiomas usuales nos permiten llegar demasiado lejos. En su lugar, deberíamos formular otros más débiles que ni siquiera nos facultasen para demostrar el primer paso de la derivación de la inversa de la fórmula de Barcan.

Con todo, existe una minoría de lógicos y filósofos que parecen dispuestos a abrazar la conclusión de que todo lo que existe lo hace necesariamente. La clave consiste en contrastar la levedad de la existencia en el dominio de los cuantificadores con el tipo de existencia, mucho más sustantiva, que poseen los objetos ordinarios, los cuales, por ejemplo, gozan de una localización espaciotemporal.

Los autores que defienden la posibilidad de derivar la inversa de la fórmula de Barcan sostienen que, si bien existimos de manera necesaria, ello no implica que poseamos una existencia sustantiva en todos y cada uno de los mundos posibles. En algunos, nuestros padres jamás se conocieron, y en ellos carecemos de localización espaciotemporal y de cualquiera de las propiedades que solemos atribuir a las personas. En esos mundos posibles seríamos personas posibles cuya existencia se vería reducida a formar parte del dominio de los cuantificadores. Deberíamos hacer frente a la insoportable levedad del ser... y a la de su necesidad.

PARA SABER MÁS

Entre la minoría de los filósofos que creen que todo existe de manera necesaria se encuentran Timothy Williamson, Ed Zalta y Bernard Linsky. Una versión del primer argumento que hemos esbozado puede hallarse en el artículo **Necessary existents**, de Timothy Williamson, publicado en el volumen *Logic, thought and language* (Cambridge University Press, 2002).

por Marc Boada

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Retazos de biosfera

Un arreglo sencillo permite estudiar la evolución de pequeños ecosistemas cerrados

Sabemos que la vida es evolución y cambio, y que los organismos son seleccionados en función de su adaptación al medio. Sin embargo, la observación de estos fenómenos no resulta fácil. El motivo: la complejidad de los organismos y de la biosfera. Por suerte, no se trata de una empresa inalcanzable. Mediante unos sencillos medios de cultivo, cuyo desarrollo debemos a Sergei Winogradsky (1853-1956), podemos adentrarnos en algunas sutilezas de la vida en ecosistemas cerrados.

Se cuentan por millones las especies vivas de nuestro maravilloso planeta. Muchas son macroscópicas y presentan numerosos requerimientos vitales, lo que suele plantear problemas al científico doméstico que pretende convertirlas en sujetos experimentales (pensemos en un sencillo acuario, que reclama tediosos trabajos de mantenimiento). Pero, para nuestra fortuna, abundan también las especies microscópicas, tan diversas y mudables que el aficionado puede cultivarlas sin dificultad. En ello se basan las columnas de Winogradsky: ecosistemas cerrados en los que se introducen nutrientes y agua sobre un sustrato sembrado con microorganismos, que se seleccionan luego mediante la regulación de la luz, la temperatura y la composición del medio.

Realicemos un primer experimento exploratorio. Tomemos un bonito bote de cristal, de los que se usan para encurtidos, conservas o mermeladas. Mejor si es alto y más bien delgado, pero cualquiera sirve mientras las paredes sean bien cilíndricas, ya que ello facilitará la observación. Lo limpiaremos a fondo para rellenar luego una cuarta parte con tierra cualquiera. A continuación, añadiremos agua no clorada hasta unos pocos centímetros de la boca, para luego cerrarlo herméticamente y dejarlo en un lugar bien iluminado, pero no bajo el sol directo. Una lamparilla de 40 vatios puede resultar óptima.

Antes de proseguir el experimento, una aclaración. Quien escribe estas líneas sustenta la opinión de que no hay experimento fácil. Tampoco este. Aunque simple, exige una paciencia notable. En los meses subsiguientes al sellado de la columna se desarrollará en su interior un sinnúmero de fenómenos que van a requerir una atenta observación. Un experimento parco en materiales y generoso en duración. Aquí radica su interés.

Observemos ahora nuestra flamante columna. Justo al principio, el líquido presenta materiales en suspensión; en las horas siguientes, precipitarán hasta formar un primer estrato sobre el fondo terrígeno. Con una simple lupa comprobaremos que esta capa presenta una textura esponjosa, porosa y de finísima granulometría. Son limos. Bajo ella observaremos arenas y gravas. El conjunto remeda la estructura básica de los depósitos sedimentarios de la litosfera. Sobre este sustrato pétreo, la capa de agua ganará en transparencia poco a poco.

Situemos ahora nuestro pequeño cultivo bajo una lámpara. La masa líquida empezará a calentarse suavemente y a evaporarse, condensando en las paredes del espacio superior. Allí las condiciones son de máxima temperatura y ventilación. Reproducen casi a la perfección la atmósfera de nuestro planeta y, de forma somera, el ciclo del agua.

Pocos días más tarde, se produce un descenso súbito de la transparencia del líquido. Nos hallamos ante una explosión biológica. De límpidas aguas pasamos a colores verdosos, signo inequívoco de una floración bacteriana y algal, que observaremos cómodamente si ponemos una cartulina blanca al otro lado de la probeta. La turbidez del fluido aumenta hasta que, otro día cualquiera, empieza a remitir. El agua recupera su transparencia. Fijémonos en el sustrato: se ha depositado otra capa finísima, formada por millones de organismos que han fallecido en una crisis producida por el agotamiento de oxígeno y otros gases. Una auténtica extinción en masa. O no, porque algunas estirpes habrán sobrevivido. Las más resistentes o mejor adaptadas a un empobrecimiento de las condiciones producido por el metabolismo de millones de sus congéneres. Poco a poco, las poblaciones supervivientes se recuperan. Al propio tiempo, el medio fluctúa; presenta una composición química dinámica, debido a la interacción de los nutrientes y los gases con el sustrato.

Al cabo de pocos días aparece una nueva floración, a la que sigue una nueva crisis. Con suerte, el ciclo se repetirá varias veces. En cada fase se deposita una nueva lámina, que vale la pena observar y documentar con celeridad, ya que también hay actividad «geológica», aunque más lenta. Si observamos los sedimentos, descubriremos, ya en las fases iniciales, la aparición, en las zonas más iluminadas, de coloraciones oscuras, que a lo largo de los meses siguientes se extenderán hasta formar una colonia única. Detectaremos también, en los barros del fondo, la formación de burbujas de gas que, al ascender, remueven los sedimentos y poco a poco destruyen la fina laminación.

Las primeras semanas son, pues, de mucho ajetreo. En el interior de la columna se suceden batallas por la vida, se forman burbujas de gas, llueve... hasta que se alcanza una fase más estática, de lento crecimiento de las colonias de especies y estirpes mejor adaptadas.

Resulta muy interesante montar dos tubos idénticos y situarlos bajo distintas iluminaciones. Casi a oscuras o en penumbra, las floraciones verdes son inexistentes. Observaremos solo la lenta aparición de tapices bacterianos de color oscuro o negro. Corresponden a organismos metabolizadores anaerobios de materia orgánica y compuestos sulfurosos, que no necesitan luz ni oxígeno. Un buen baño de fotones, en cambio, ya hemos visto que favorece la presencia de algas verdes y bacterias. Pero no nos excedamos. La exposición a los rayos solares frena la proliferación, reduce la biodiversidad del me-

dio e incluso impide el crecimiento de unas curiosas algas que detectaremos más tarde con métodos especiales.

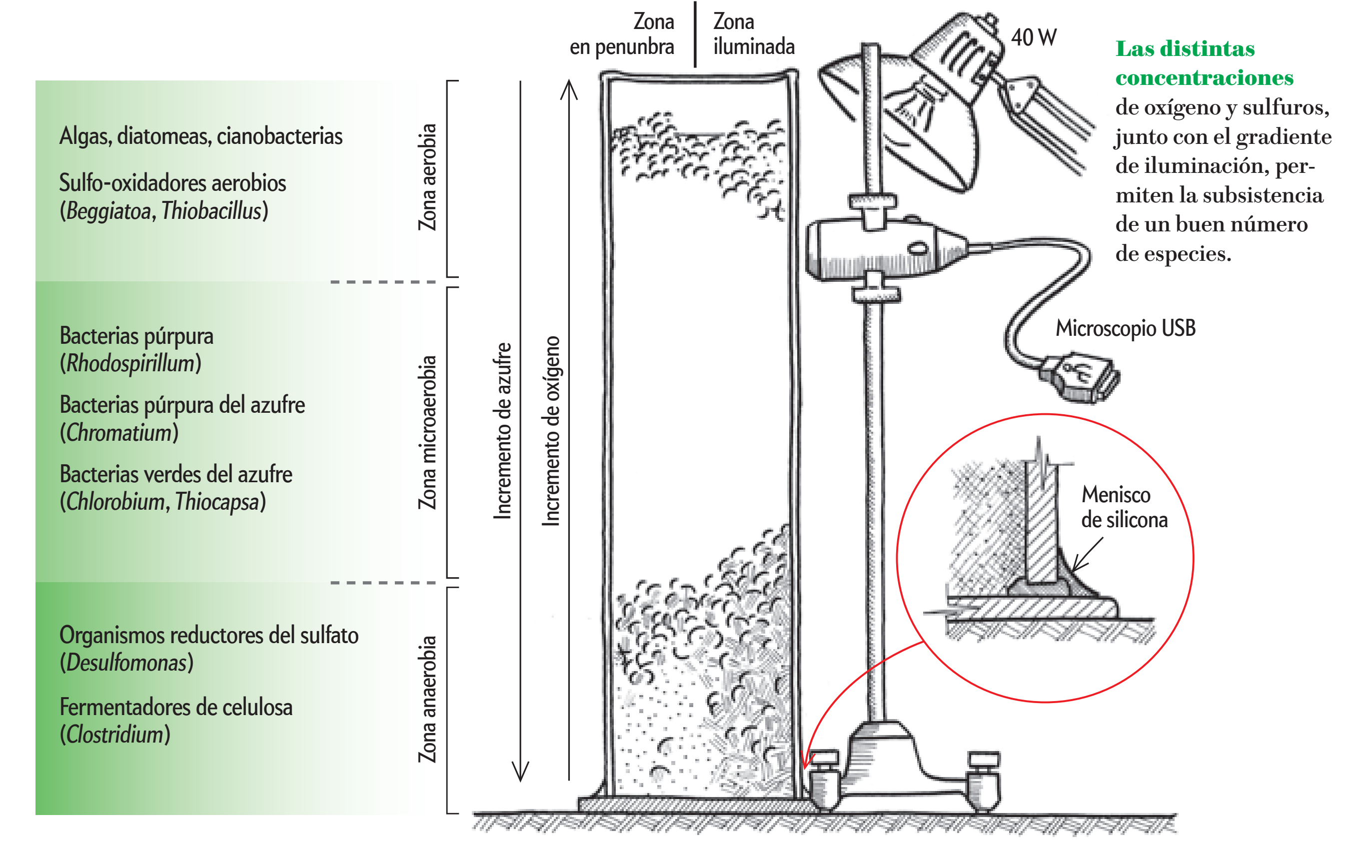
Visto lo más básico, construiremos ahora una versión más refinada de este maravilloso artefacto. En cualquier tienda de precio único encontraremos unos estupendos y variados recipientes de cristal procedentes del lejano oriente. Podemos escoger un vaso largo, cilíndrico y de cristal liso, apto para servir algún alcohol escocés. U otro de mayor tamaño, que podría usarse a modo de florero. Fijémonos en su canto superior. Es preferible que, en vez de estar hecho al fuego, redondeado y brillante, sea esmerilado, plano y mate. Ello facilitará el sellado posterior. El tamaño lo escogeremos en función del presupuesto, pero sin olvidar que cuanto mayor sea el tubo de cristal, mayor diversidad y número de extinciones podremos documentar. Los recipientes de 300 o 400 milímetros de altura y poco más de 100 de diámetro pueden ser una inversión óptima (tamaños superiores disparan los costes). Luego encarguemos en cualquier cristalería una pieza cuadrada de vidrio, con una arista al menos 40 milímetros mayor que el diámetro del tubo y un espesor de 5 o 6 milímetros.

Ya en el laboratorio, limpiaremos todo a fondo y tomaremos medidas para garantizar que la vida se manifieste en todo su esplendor. La estrategia es simple: aportaremos los oligoelementos necesarios para fertilizar el medio. Introduciremos algunos gramos de sulfato cálcico (yeso). Luego, carbonato cálcico, en forma de cáscaras de huevo machacadas, conchas o roca calcárea finamente pulverizada, que además hará la función de compuesto tampón. Incluiremos alguna fuente de fósforo (huesos calcinados) y concluiremos nuestro abonado con nitrógeno, en forma de compuestos activos, nitrato amónico, urea o nitrato potásico. Otra opción práctica consiste en utilizar abono vegetal (unos pocos gramos bastan); el del césped resulta óptimo, ya que incorpora todos los elementos citados en forma de compuestos fácilmente metabolizables.

Mezclaremos el abono con papel de periódico y todo ello con lodos biológicos más ricos que la simple tierra que hemos usado antes. A este respecto resultan idóneos los materiales que podemos dragar del fondo de balsas, estanques o depósitos al aire libre, siempre y cuando no hayan sido clorados, ya que entonces la esterilización reducirá la variedad de especímenes. Esos barros oscuros, a menudo pestilentes, son ricos en materia orgánica y acostumbran a estar exentos de piedras y gravas. Lo mismo sirve para el agua con que rellenaremos el tubo: mejor de un pantano o balsa que de un riachuelo de aguas límpidas y cristalinas.

Procedamos al llenado. Con el vaso en posición vertical aportaremos el sedimento y añadiremos agua sin llegar a llenarlo (debe quedar libre cierto espacio). Limpiaremos el canto y, sin prisas, extenderemos un generoso cordón de silicona antimoho. Si no sale bien, no pasa nada. Con un cuchillo retiraremos la silicona, limpiaremos a fondo y volvemos a empezar. Acto seguido colocaremos el cristal y lo presionaremos con un peso que no resulte excesivo; una botella llena servirá.

Al cabo de un par de días, retiraremos el peso. Comprobaremos, a través del cristal superior, que la silicona haya formado una junta sin discontinuidades. De no ser así, tampoco deberemos abrumarnos. Sin invertir el bote, recortaremos la silicona sobrante con un cúter hasta dejar todo bien limpio. Luego extenderemos un nuevo cordón del elastómero en el diedro formado entre el tubo y la placa de cristal, que alisaremos poco a poco con el dedo bien humedecido hasta formar un menis-



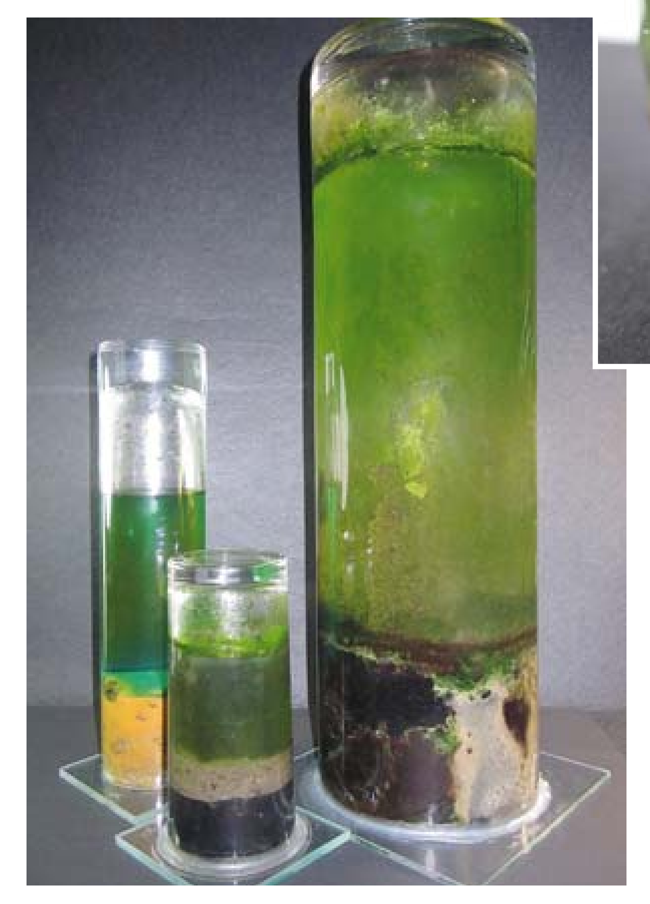
Las distintas concentraciones de oxígeno y sulfuros, junto con el gradiente de iluminación, permiten la subsistencia de un buen número de especies.

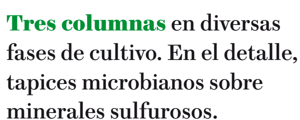
co generoso. Esperaremos un par de días más para luego invertir el conjunto; lo agitaremos ligeramente para que todo recupere su posición. Una vez situado en el punto escogido, intentaremos no volver a moverlo más, e intentaremos que las condiciones sean lo más estables o continuas posibles.

Amén de la observación dilatada, el interés de este experimento radica también en las distintas técnicas observacionales. En los tiempos de Winogradsky solo era posible observar las colonias extrayendo muestras con una pipeta, para luego llevarlas al microscopio. Hoy, en cambio, las posibilidades son más amplias. Una opción consiste en escudriñar la muestra bajo un tipo de luz que ponga de manifiesto la progresión de ciertas especies crípticas. Intentémoslo con una lámpara de luz ultravioleta (como las que se utilizan para verificar la autenticidad del papel moneda, que podremos conseguir también en un bazar oriental). Con la habitación a oscuras, descubriremos cómo a lo largo de los meses prosperan, no sin dificultades, colonias de algas pardas que manifiestan una bonita fluorescencia roja cuando se iluminan con «luz negra». Aparecerán también concreciones calcáreas en la pared interior del vaso, por encima de la superficie libre del líquido, que rematan como un festón la frontera exterior de las colonias capaces de crecer fuera del agua, aprovechando la capilaridad para mantenerse bajo una humedad suficiente.

Resulta espectacular la diferencia entre la cara expuesta directamente a la luz y la posterior. La primera se recubre en meses de un tupido tapiz algal, que de vez en cuando se desprende para engrosar un sedimento creciente. En la parte umbría, en cambio, el tapiz es más delgado y diverso, con algas rojas y de distintas coloraciones verdosas, signo inequívoco de una mayor diversidad.

¿Cuáles son los límites del cultivo in vitro de organismos? Los de la propia vida... y los de nuestra habilidad experimental, claro. Podemos pergeñar instalaciones con brutales limitaciones tróficas y torturar las bacterias como jamás haríamos con ningún animal visible a simple vista. Una columna poco iluminada llena solo con agua de manantial, embotellada o procedente de la fusión de la nieve, puede presentar en pocos meses unos sutiles, etéreos y bellísimos flóculos que crecen hasta alcanzar algún centímetro, en flotación neutra y sin alimentarse aparentemente de nada. ¿De dónde proceden estos microorganismos? Pues de la infinidad de esporas, quistes de resistencia y otras formas de vida que llenan el medio. En una columna con gravilla de río lavada hasta la saciedad con agua destilada se crían en un par de años colonias de algas rojas, fluorescentes, que progresan con una parsimonia exasperante. Y si nos tomamos el trabajo de recolectar unos centilitros de agua de una surgencia sulfurosa, una balsa minera o, mejor todavía, un efluente equiparable a los de Riotinto, y los cultivamos con un sustrato de calcopirita, calcosina, pirita o marcasita, conseguiremos seleccionar bacterias extremófilas, capaces de vivir en un auténtico infierno de compuestos sulfurosos, férricos y cúpricos. Estos organismos metabolizan las moléculas que contienen azufre, depositando óxidos metálicos hidratados, a veces con los bonitos colores verdosos y azules de los compuestos de cobre. En pocos meses se forman concreciones, al soldarse los gránulos que habíamos introducido. Un estupendo caso de génesis de minerales bioconstruidos.



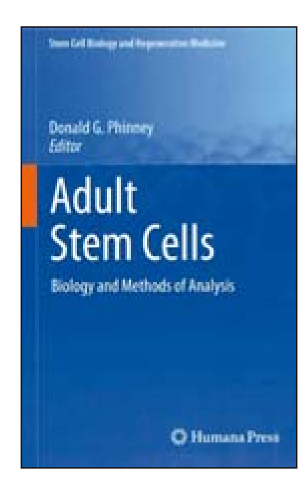


Tres columnas en diversas fases de cultivo. En el detalle, tapices microbianos sobre minerales sulfurosos.

MARC BOADA

Abundando en los aspectos observacionales, tan mejorados hoy en día, existe un motivo más para optar por tubos de gran tamaño: su radio de curvatura, más suave, facilita la observación microscópica. Pero ¿cómo miraremos al microscopio un tubo vertical de algunos kilos de peso, que de entrada debe permanecer inmóvil? Viene en nuestra ayuda un instrumento que lleva poco en el mercado. Nos referimos al microscopio USB: en esencia, una cámara de fotos digital dotada de un objetivo clásico de microscopio. A través del puerto USB de nuestro ordenador, arroja directamente en la pantalla imágenes que podemos capturar con solo pulsar un botón. Pese a su reducidísimo coste, los aumentos oscilan entre algunas decenas y más de trescientos diámetros. Si lo acoplamos a un pequeño trípode o a un estátor de laboratorio, podremos inspeccionar todo lo que se mueve en el interior de la columna. Marquemos con rotulador los puntos de mayor interés y tomemos fotos con cierta periodicidad. Por fin, mediante un proyector conectado al ordenador, podremos convertir el microcosmos encerrado en la columna de Winogradsky en un retazo de biosfera visible para todos. El espectáculo está servido.

Los lectores pueden hallar ampliaciones de este experimento y contactar con el autor en el blog **Taller y Laboratorio 2.0** *www.investigacionyciencia.es/blogs*



ADULT STEM CELLS: BIOLOGY AND METHODS OF ANALYSIS.

Coordinado por Donald G. Phinney. Humana Press-Springer; Nueva York, 2011

Células madre adultas

Una vista de conjunto sobre su naturaleza y métodos de análisis

Los estudios sobre células madre, embrionarias o adultas, se sitúan en la avanzadilla de la investigación genética. Muy reciente es, además, el descubrimiento de poblaciones de células troncales o progenitoras en numerosos tejidos y órganos adultos. El recambio celular constituye un rasgo principal de los tejidos a lo largo de la vida de los organismos: la sustitución de células perdidas resulta decisiva para el cumplimiento adecuado de la función de los órganos. Aunque el concepto de sustitución celular tenía una historia centenaria, las pruebas experimentales llegaron de los trabajos realizados a raíz de las bombas de Hiroshima y Nagasaki, donde muchos supervivientes de la explosión sucumbieron en cambio ante las enfermedades de la radiación.

Los experimentos de mediados de los cincuenta demostraron que el daño radiactivo del sistema inmunitario de ratón y humanos revertía mediante el injerto de médula ósea de un donante. A comienzos de los sesenta, los ensayos de James Till, Ernest McCulloch y otros sobre la hematopoyesis condujeron a la identificación del tipo celular reconstituyente. Denominado célula madre, ese tipo celular fue definido por su capacidad para crear copias de sí mismo («autorrenovación») en el curso de la vida, generar múltiples tipos celulares hijos («multipotencia») y regenerar el sistema del órgano en que reside («reconstitución»). Esas tres características diferencian a las células madre de otros tipos de células proliferantes. Al establecimiento del concepto de célula madre hematopoyética le siguió el descubrimiento de célula madre en otros órganos (células madre epiteliales, células madre intestinales). Las células madre pueden encontrarse en áreas específicas de cada órgano; en 1978, Schofield propuso el concepto de nicho para designar esos microambientes funcionalmente específicos de las células madre. La misión de ese hábitat se sustanció con el estudio de células madre de la línea germinal en *Drosophila*, donde quedó demostrada *in vivo* la existencia de nichos.

Debido a los mecanismos que regulan la proliferación celular, la esperanza de vida y la senescencia, inextricablemente entrelazados, resulta harto difícil distinguir *in vitro* entre célula madre, célula progenitora y célula somática. A las células madre de tejidos adultos se les llama células madre somáticas, para distinguirlas de las células madre de la línea germinal de las gónadas que generan óvulos y espermatocitos haploides, de las células madre totipotentes del embrión en estado de mórula, y de las células madre «embrionarias» pluripotentes del blastocisto anterior a la gastrulación. Importa resaltar que la capacidad de reconstitución de las células troncales solo puede comprobarse en su plenitud cuando el organismo sobrevive a la pérdida completa de un órgano. Las células madre pluripotentes inducidas, reprogramadas a partir de células somáticas con factores definidos, se nos ofrecen como la gran esperanza de la medicina regenerativa en cuanto fuente renovable de células autólogas.

Las células madre poseen propiedades idóneas para la homeostasis y reparación del tejido. ¿Cómo logran generar tipos celulares maduros sin agotar su capacidad de autorrenovación? Las células madre interpretan múltiples señales para controlar el equilibrio entre autorrenovación y quiescencia. La autorrenovación de la célula madre se halla dinámicamente regulada a lo largo de toda la vida, se integra en la especificación del linaje y refleja la conservación de muchos mecanismos intrínsecos y extrínsecos a partir del desarrollo fetal.

Sea por caso el sistema nervioso. El descubrimiento de las células madre neurales y su neurogénesis en el cerebro adulto marcó un hito en biología. Desde la caracterización histológica inicial del cerebro en el umbral del siglo XIX, se pensó durante largo tiempo que la arquitectura del cerebro adulto era incompatible con la regeneración celular; no nacían nuevas neuronas, una vez terminado el desarrollo. Ese dogma se desmoronó en la segunda mitad de la centuria siguiente. El descubrimiento de esa neurogénesis inesperada planteaba tres cuestiones importantes: ¿dónde se hallaban las células madre del cerebro adulto? ¿Cómo surgían? ¿Qué función cumplían?

Se ha indicado la presencia de células proliferativas en numerosas regiones del sistema nervioso central adulto. Con toda nitidez, la neurogénesis adulta se produce en la zona periventricular adyacente al estriado y en el giro dentado de la formación del hipocampo. Los progenitores neuronales se generan a partir del área periventricular prosencefálica y emigran hasta el bulbo olfatorio, donde maduran en neuronas. (Suelen relacionarse esas nuevas neuronas con la discriminación olfatoria y la memoria.) El cerebelo prosigue la neurogénesis después del nacimiento, aunque no está claro que la neurogénesis cerebelar persista en la edad adulta. Las células endoteliales, epindímicas y el plexo coroideo son fuentes de señales que podrían regular el sistema nervioso central posnatal y adulto. Seguimos sin conocer la función que cumplen en el cerebro adulto las nuevas neuronas. La neurogénesis aumenta en respuesta a estímulos ambientales de corte muy dispar. El sistema inmunitario, los ictus y la radiación regulan la neurogénesis; los antidepresivos la aumentan.

Las células madre adultas presentan varios rasgos insólitos que las distinguen de otros tipos celulares proliferativos. Aquellas sobreviven en ensayos de ablación mitótica porque se dividen solo infrecuentemente, fenómeno que se denomina quiescencia.

Las propiedades de las células troncales se miden mediante los análisis clonales, una familia de métodos que permiten ir registrando en el tiempo los descendientes mitóticos de una misma célula (un clon). Las técnicas se remontan a los años veinte y son fundamentales para estudiar las relaciones de linaje entre células durante el desarrollo. Para su aplicación se requieren un marcador de linaje (un rasgo distintivo autónomo que se propaga a todos los descendientes de la célula original marcada) y una dilución limitante (en donde las células inicialmente marcadas se encuentran suficientemente aisladas unas de otras para evitar colonias mixtas).

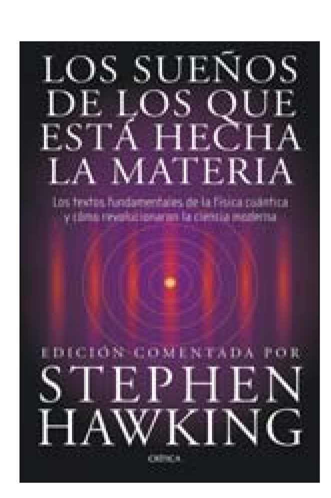
Los marcadores del tipo celular pueden emplearse para el aislamiento prospectivo de células del sistema nervioso central y de la cresta neural, porque la propiedad seleccionada de la célula predice estrechamente la función celular. Con el trazado del linaje clonal pueden acoplarse técnicas varias para caracterizar las propiedades funcionales de las células madre y progenitoras. Se utiliza la inmunocitoquímica para medir marcadores indicativos de un tipo particular de células. Pueden emplearse histoquímicamente anticuerpos contra los antígenos de la superficie celular.

En el caso del sistema nervioso, la combinación de análisis *in vitro* y análisis *in vivo* de las células madre y sus derivados es indispensable para estudiar los mecanismos que controlan su destino final. El análisis *in vitro* de células aisladas presenta a su favor la ventaja de una manipulación más fácil y un análisis bioquímico y molecular más detallado; en su contra, la potencial alteración de las propiedades de las células sacadas de su entorno endógeno. Los análisis *in vivo* reducen al mínimo posibles artefactos, pero resultan onerosos y, aunque los métodos están refinándose, no pueden llevarse hasta un análisis molecular de la señalización intracelular.

Uno de los rasgos característicos de las células madre, hemos subrayado, es su capacidad de autorrenovación, la capacidad de acometer divisiones celulares, asimétricas y simétricas. La división asimétrica de una célula madre origina una copia exacta de sí misma, con idéntica potencia generativa, y una célula hija que se diferenciará en células maduras del tejido. El ciclo de división celular se halla regulado por procesos que aseguren la replicación del ADN y la segregación de componentes celulares entre células hijas durante la citocinesis. Se sabe de moléculas, en número cada vez mayor, que coordinan el ciclo celular y la autorrenovación del sistema nervioso central. La capacidad de autorrenovación constituye la característica principal de las células madre.

En el sistema hematopoyético de los mamíferos, hay dos tipos de células madre: quiescentes y activas (en ciclo). El estado quiescente es necesario para mantener la capacidad de autorrenovación de las células madre hematopoyéticas y evitar su agotamiento. La pérdida de p21, un regulador de punto de control y un inhibidor quinasa dependiente de ciclina, permite que la célula madre hematopoyética abandone el estado de quiescencia y promueva su entrada en el ciclo celular. El mantenimiento de la célula madre hematopoyética quiescente constituye la función primaria del nicho celular en la médula espinal. Citoquinas, factores de desarrollo, factores ambientales locales y moléculas de adhesión desempeñan un papel clave en la quiescencia. Habría un nicho osteoblástico y un nicho perivascular. El nicho aporta un microambiente y factores solubles que regulan la función de las células madre. Además, bajo condiciones que limitan el suministro de células maduras, las células del nicho y los factores que ellas secretan pueden modularse para activar las células madre y acelerar su diferenciación.

—Luis Alonso



LOS SUEÑOS DE LOS QUE ESTÁ HECHA LA MATERIA.

Edición e introducción de Stephen Hawking. Editorial Crítica; Barcelona, 2011.

Sueños hechos realidad

Recopilación de escritos cuánticos fundamentales

La mecánica cuántica y la teoría de la relatividad son sin duda los dos auténticos paradigmas de la física contemporánea. La teoría de la relatividad es tal vez más popular, seguramente por la personalidad de Einstein y por la relación que usualmente se establece entre su famosa fórmula, $E = mc^2$, y la bomba atómica. No obstante, la mecánica cuántica es realmente la teoría más representativa de la física moderna y la que tiene mayor repercusión, no solo por su interés fundamental, sino también por sus aplicaciones prácticas, de notable incidencia socioeconómica.

La idea del cuanto (*quantum*) surgió, de un modo no demasiado espectacular, cuando Max Planck presentó ante la Sociedad Alemana de Física, el 14 de diciembre de 1900, una comunicación en la que se explicaba la distribución en frecuencias de la energía emitida (radiada) por un «cuerpo negro». En dicha comunicación, se postula por primera vez que la absorción y emisión de radiación electromagnética por la materia se realiza en cantidades discretas (cuantos) de energía, introduciéndose la constante universal h (constante de Planck). El siguiente —fundamental— paso lo dio Einstein en 1905 al postular que la radiación se absorbe y emite de manera discontinua porque es en sí discontinua, es decir, existen «átomos de radiación» (fotones). Tras esto vino la aplicación de las ideas de Planck a la estructura atómica, iniciada por el danés Niels Bohr, y a partir de ahí un desarrollo de estas ideas cada vez más creciente hasta la formulación de una nueva mecánica (mecánica cuántica) por Werner Heisenberg (1925) y Erwin Schrödinger (1926).

En *Los sueños de los que está hecha la materia*, Stephen Hawking ha recopilado gran parte de los artículos fundamentales del período de la «vieja teoría cuántica» (1900-1925), así como los de la creación de la mecánica cuántica propiamente dicha y de su extensión para incluir la relatividad (especial), la llamada mecánica cuántica relativista, y tras ella la teoría cuántica de campos, en particular, la electrodinámica cuántica. Son treinta y tres escritos distribuidos en nueve partes que reflejan el desarrollo de la física cuántica desde sus orígenes hasta su madurez (primera mitad del siglo pasado). Además de la introducción general a la obra, Hawking comenta, breve y claramente, el contenido de cada una de las partes.

En las tres primeras aparece una muestra muy representativa de los escritos que dieron lugar a la teoría cuántica, desde los fundamentales de Planck, Einstein y Bohr, anteriores a la mecánica

cuántica en sí, hasta los de Heisenberg y Schrödinger, creadores de esta nueva mecánica. La parte cuarta está dedicada a su primera extensión relativista. Presenta dos trabajos históricos: uno de Dirac, en el que se introduce la ecuación relativista que lleva su nombre, a partir de la cual predijo la existencia de las antipartículas, y otro, quizá menos conocido fuera de la comunidad de físicos teóricos, pero igualmente magistral, de Pauli («La conexión entre espín y estadística»).

La interpretación de la teoría cuántica (¿qué representa realmente la función de onda o el estado cuántico?) ha dado lugar a un intenso debate, iniciado en la década de los veinte del siglo xx por dos gigantes de la física, Einstein y Bohr, y vigente en la actualidad. La parte quinta contiene una muestra muy significativa de trabajos básicos relacionados con esta cuestión. Empieza con el que de alguna manera dio lugar al debate, el artículo de Max Born (1926) «La interpretación estadística de la mecánica cuántica»; sigue con el de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), en el que se arguye que la mecánica cuántica no da una descripción completa de la realidad física, junto con la respuesta de Bohr y el artículo de David Bohm, que presenta la primera teoría «seria» de variables ocultas (no locales); acaba con el de John Bell sobre la paradoja EPR, en el que se deducen las conocidas desigualdades, cuya violación (comprobada experimentalmente) confirma la inexistencia de variables ocultas locales. Como se hace notar a pie de página, este artículo había aparecido ya en español en el libro de John Bell *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica* (Alianza Editorial, 1990), que tuve el privilegio de traducir y prologar. (El libro apareció unos meses antes de la muerte —inesperada— de Bell.)

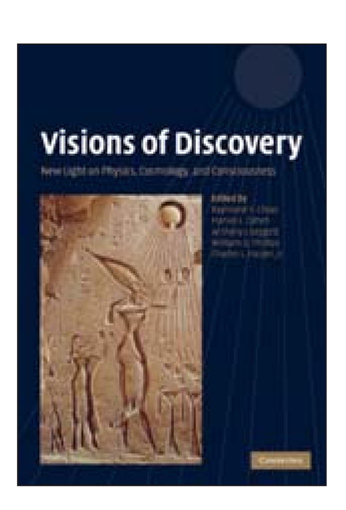
Las partes sexta y séptima se dedican a una serie de trabajos sobre los orígenes de la teoría cuántica de campos, destacando los de Dirac. Es digno de resaltar el acierto de Hawking al incluir el artículo, de 1947, de W. Lamb y R. Retherford (no es una errata, no es Rutherford), quienes midieron mediante el entonces novedoso método de espectroscopia de microondas la diferencia de energía entre dos niveles del átomo de H ($^2S_{1/2}$, $^2P_{1/2}$), que no debería existir según la ecuación relativista de Dirac. Esto indicaba que había que ir más allá de la mecánica cuántica relativista, hacia una nueva electrodinámica cuántica, algo que hicieron el japonés Tomonaga y los estadounidenses Feynman y Schwinger, los primeros en formular la electrodinámica cuántica de manera matemáticamente consistente. Los trabajos originales de Feynman y de Tomonaga están reproducidos en la parte octava, junto con otro también fundamental del angloamericano Dyson. La parte novena (final) está dedicada a escritos más largos y conferencias de algunos de los físicos cuánticos más representativos.

Conviene advertir que este no es un libro de divulgación; para leerlo provechosamente en su totalidad hay que tener una buena formación en mecánica cuántica. Quienes la tengan disfrutarán leyendo —y trabajando— los artículos originales de algunos de los físicos teóricos más notables del siglo pasado (y de todos los tiempos). No obstante, los escritos históricos —y alguna conferencia— contenidos en el libro pueden resultar bastante accesibles a quienes, sin ser especialistas, les interese el desarrollo histórico de la física cuántica.

La traducción es en general buena. Hay algunas erratas, casi todas en ecuaciones, fácilmente subsanables (al lector interesado quizá le divierta corregir la que aparece en el primer artículo de Planck, en la página 27, bastante curiosa).

En conclusión, creo que debe elogiarse a la Editorial Crítica por haber llevado a cabo la publicación en castellano de esta importante colección de escritos cuánticos fundamentales de considerable interés científico, además de histórico.

—José L. Sánchez Gómez
Universidad Autónoma de Madrid



VISIONS OF DISCOVERY. NEW LIGHT ON PHYSICS, COSMOLOGY, AND CONSCIOUSNESS.

Dirigido por Raymond Y. Chiao, Marvin L. Cohen, Anthony J. Leggett, William D. Phillips y Charles L. Harper, Jr. Cambridge University Press; Cambridge, 2011.

Fundamentos

Sobre orígenes y cuestiones no resueltas

No es frecuente que un científico realice un cúmulo de aportaciones tan determinantes que modifiquen el curso de la civilización. Charles Townes, a quien se le homenajea en este ambicioso volumen, es una de esas excepciones con su participación en el descubrimiento del máser y del láser. Los lectores de discos compactos, los escáneres de códigos de barras, la cirugía de cataratas y oncológica, la ortodoncia sin anestesia, la defensa antimisil, la fusión nuclear controlada, la fibra óptica, los hologramas de identidad en tarjetas de crédito, los hologramas de navegación aérea, todos se basan en el láser. Los intereses de Townes se extienden desde el origen del universo hasta la estructura de las moléculas, pasando por la óptica cuántica y sin perder nunca de vista la naturaleza humana. En homenaje a su obra, este libro explora las cuestiones básicas de la ciencia, la filosofía y la existencia. ¿Cómo empezó el universo? ¿Por qué las constantes de la naturaleza presentan esos valores? ¿Qué es la consciencia humana?

El descubrimiento de Townes no se explica sin el cambio operado en física con el advenimiento de la relatividad y la mecánica cuántica, las «ciencias de la luz». En el *annus mirabilis* de 1905, Albert Einstein publicó un estudio sobre el movimiento browniano, otro sobre la teoría especial de la relatividad y un tercero que contenía la ecuación $E = mc^2$, que iba a explicar fenómenos tan dispares como la fusión nuclear en el Sol y la fisión nuclear en el núcleo de la Tierra. Recibió el premio Nobel por su artículo sobre mecánica cuántica, con su explicación del efecto fotoeléctrico, que está en la base de la tec-

nología moderna. Menos conocido es el escrito einsteiniano de 1917 «Sobre la teoría cuántica de la radiación». Townes descubrió en ese trabajo el camino que le conduciría hasta el máser y el láser. Se sabía que los átomos en estados excitados emitían espontáneamente luz a medida que decaían en estados de energía inferiores. Einstein predijo que los átomos excitados se mostraban exponencialmente proclives a emitir luz si eran estimulados por fotones de la misma frecuencia que la luz emitida. Además, los fotones emitidos viajaban en la misma dirección y con la misma fase de oscilación que los fotones que instaron su emisión. Lo que, a su vez, desencadenaba una cascada vertiginosa de fotones idénticos, un proceso que se conoce por amplificación coherente. En 1954, Townes inventó una forma inteligente de utilizar moléculas de amoníaco como medio para la amplificación coherente: una amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación, es decir, el máser.

Cuatro años más tarde, con Arthur Schawlow, expandió la técnica a las longitudes de onda ópticas, produciendo el primer amplificador de luz, el láser, según describían en «Infrared and optical masers», publicado en *Physical Review*. «Por su aportación fundamental en electrónica cuántica, que ha llevado a la construcción de osciladores y amplificadores basados en el principio del máser-laser», Townes recibió el Nobel de física en 1964, compartido con Nicolái Gennádyevich Báson y Aleksandr Mikhailowich Prójorov. (Wolfgang Ketterle extendió el principio de coherencia y de emisión estimulada desde las ondas electromagnéticas a las ondas de materia.)

Townes ha reflexionado a menudo sobre el reduccionismo y sus límites, en un contexto de positivismo estricto, surgido a comienzos del siglo xx. Este elevaba la observación por encima de todo y tenía en poco aprecio la teoría. Influyó sobre filósofos y científicos. Arrancaba de Ernst Mach, para quien los objetos de nuestro mundo, el único del que valía la pena ocuparse, eran resultado de una conjunción laboriosa y a veces accidental de sensaciones elementales. Las sensaciones se iban combinando en otras complejas que creaban las cosas, incluida la noción del yo. En su homenaje se formó la *Sociedad Ernst Mach*, integrada por científicos, sociólogos y filósofos con el propósito de crear una filosofía no filosófica. Para filósofos de formación física, como Rudolf Carnap y Moritz Schlick, se trataba de ensamblar la nueva lógica formal de Gottlob Frege y Bertrand Russell con el positivismo sensista de Mach. Esos positivistas lógicos entendieron la ciencia como las observaciones lógicamente combinadas. Las teorías servían a modo de manual para codificar las observaciones.

Hasta los años sesenta no se produjo el cambio que devolvería a la teoría su papel regio en la ciencia. Cuando la teoría cambiaba, arrastraba consigo a la observación y al diseño experimental. Thomas S. Kuhn, que había estudiado físicas y realizado la tesis con Van Vleck, publicó en 1962 *The structure of scientific revolutions*, donde se rebelaba contra la primacía de la observación y refutaba la idea de que existiera un lenguaje universal de protocolos de observación (defendido por Carnap) que permitiera unir dos estructuras teóricas cualesquiera. El cambio de la física newtoniana a la einsteiniana no podía venir instado solo por enunciados observacionales.

Nuestra búsqueda de una correspondencia *precisa* entre ecuaciones matemáticas y fenómenos del mundo real separa la física moderna de cualquier otra empresa intelectual. A través de su extraordinario trabajo en espectroscopia molecular, Townes extendió el alcance y refinó la precisión de esa correspondencia. Si los valores de las constantes fundamentales variaran de un lugar a otro, podrían también variar en el curso del tiempo. Si distintos universos difiriesen discretamente y se hallaran separados por grandes barreras de energía, las transiciones serían raras y catastróficas, pero si hubiera campos ligeros que variasen continuamente, su evolución podría manifestarse mediante un cambio palmario en las constantes fundamentales.

Hay muchas constantes fundamentales en la naturaleza. Las más fundamentales son las dimensionales, que aparecen en el esquema básico de la relatividad y la mecánica cuántica: la velocidad de la luz c, la constante cuántica de Planck h, y la constante de la gravedad de Newton G. Estos números dimensionales determinan las unidades de medición básica, a saber, longitud, tiempo y masa. La velocidad de la luz c es la velocidad limitante y establece una unidad de longitud en el tiempo. La constante h de Planck establece la escala de cuantización; por consiguiente, el momento angular se cuantiza siempre en unidades de h y establece una unidad de masa por el cuadro de la longitud en el tiempo. La constante de Newton, unidad de longitud al cubo por masa y tiempo al cuadrado, determina la escala natural de la curvatura del espaciotiempo que es origen de la gravedad. En física fundamental conviene adoptar unidades (unidades de Planck) en las que c, h y G se tomen todas igual a la unidad; en otras palabras, expresar todos los demás parámetros físicos en términos de estas unidades fundamentales. Pero entonces podemos preguntarnos si otras «constantes de la naturaleza», tales como la carga del electrón, son constantes. ¿Podrían cambiar en el transcurso del tiempo? La carga al cuadrado del electrón, en unidades de $h \cdot c$, es igual a 1/137.036999708... Esta constante de estructura fina mide la intensidad de la fuerza electromagnética. ¿Podría variar con el tiempo? Gross da una solución.

Una de las contribuciones conocidas de Townes es la relacionada con el SETI óptico. El SETI óptico nos remite a la búsqueda de inteligencia extraterrestre a través del rastreo de destellos ópticos en el firmamento. El programa SETI fue iniciado por Philip Morrison (comentarista de la sección de libros de *Scientific American* durante decenios) y Giuseppe Cocconi en 1959. Se aprestaron a detectar seres de otros mundos mediante la escucha de sus radioseñales. En 1961, Townes sugirió que la búsqueda de la radiación láser constituiría otra manera óptima de descubrir extraterrestres. Comprobó que los haces láser alcanzarían la misma eficacia que los radiotransmisores en la comunicación a través de distancias interestelares. Se tardó algún tiempo en equiparar la técnica de láser con la de radio. Hubo programas SETI ópticos en la URSS; en EE.UU. Paul Horowitz, en Harvard, y David Wilkinson, de Princeton, acometieron una investigación sistemática conjunta que todavía perdura. El programa es sumamente barato, con telescopios que resultan inútiles para otro menester. Cierto es que no hemos podido conocer nada de ninguna civilización foránea, a lo largo de cuarenta y cinco años de seguimiento. Pero cosas no menos improbables han sucedido en el campo de la astronomía, como el descubrimiento de los púlsares por Jocelyn Bell, el hallazgo de planetas alrededor de una estrella de neutrones por Alexander Wolszczan y el descubrimiento de la aceleración del universo por Saul Perlmutter. Esos descubrimientos no eran menos improbables que el de una señal de láser extraterrestre.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

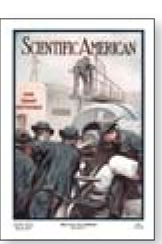


Mayo 1962

El primer satélite de rayos gamma

«Durante el año pasado hemos obtenido un atisbo del universo, tal como lo han revelado los fotones de alta energía que denominamos rayos gamma. Ese destello nos lo han proporcionado menos de 100 fotones energéticos captados por un "telescopio" de rayos gamma puesto en órbita el 27 de abril de 1961 por el satélite artificial Explorer XI. Dudamos de que antes se haya analizado una cantidad tan pequeña de partículas con tanto detalle para extraer información acerca del universo. El análisis aún prosigue en nuestro laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts. La muestra completa de eventos que nos disponemos a evaluar asciende solo a 22.

—William L. Kraushaar y George Clark»



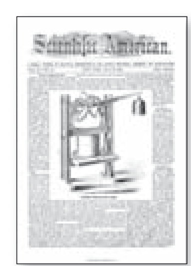
Mayo 1912

El método de Montessori

«Aún no está claro a qué se debe el gran interés popular despertado por el método de la doctora Montessori. En realidad, estamos todos tan descontentos con los resultados de nuestros esfuerzos educativos que vemos con interés cualquier nuevo método que se nos ofrezca; ¿o más bien ocurre que ahora contamos con unos medios publicitarios de los que no disponían los reformadores de la enseñanza en tiempos anteriores? Sea cual sea la causa, el interés está plenamente justificado. Nos hallamos ante una mujer científicamente preparada, con un gran amor hacia la humanidad y unos elevados ideales educativos. Ha dedicado años de su vida a desarrollar lo que ella considera un método racional y eficaz para educar a los niños de entre tres y seis años de edad. Emplea procedimientos que ya se han mostrado válidos en la instrucción de discapacitados. Al aplicarlos en niños normales ha obtenido resultados realmente sorprendentes.»

Venta al menudeo

«Hay mujeres e igual número de hombres que se sirven de extraños medios para ganar dinero. Algunos pertenecen a una clase que podría denominarse "chivo expiatorio", pues su ocupación es ser "despedidos" unas cuantas veces cada día de los grandes almacenes en los que están "empleados". Cuando un cliente gruñón o estirado se queja de la descortesía de un dependiente, se cita a uno de los "chivos" al despacho del encargado de esa sección. Allí recibe un buen sermón ante el airado cliente, es sumariamente "despedido" y la queja se desvanece entre sonrisas.»



Mayo 1862

Ferrocarril subterráneo

«En Londres se encuentra ya en un avanzado estado de construcción un ferrocarril subterráneo, con un trayecto de más de siete kilómetros bajo la urbe. Parte de la calle Victoria, en el centro de lo que en tiempos fue una vía pública de mala fama, pero que ahora constituye el nudo de enlace entre las líneas Great Northern, London, Chatham y Dower. Con ocasión de un reciente viaje por un tramo del recorrido, descubrimos que el aire era muy agradable y carecía de impurezas y humedad. Se emplean unas locomotoras que condensan el vapor y consumen sus propios humos, por lo que no se perciben gases ni vapores.»

El ferrocarril se inauguró en 1863; algunos tramos de sus túneles siguen en servicio en el actual metro de Londres.

Trineo innovador

«Los muchachos podrán ahora deslizarse ladera abajo de los empinados montes cubiertos de nieve, cómodamente sentados en posición erguida, con pies y piernas a bordo, y guiar el vehículo con unas riendas cual si de un dócil corcel se tratara. Obsérvese en el grabado cómo se logra ello en el trineo de inercia de Isaac N. Brown, dotado de un patín de guiado montado en la parte delantera. El grabado ilustra asimismo el peligro de los antiguos trineos, los que nosotros usábamos de niños.»

Este trineo parece una idea magnífica. ¿Y cómo ignorar la moraleja expuesta en la ilustración? Para otras magníficas ideas del año 1862, unas viables y otras no, vea la muestra de diapositivas en ScientificAmerican.com/may2012/inventions



Trineo guiable: Digno es de lástima todo muchacho que no tiene un trineo de inercia Brown, ya que no puede evitar los obstáculos.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. VI, N.º 19; 10 DE MAYO DE 1862

EVOLUCIÓN HUMANA

El origen del género *Homo*

Kate Wong

El extraordinario hallazgo de unos fósiles en Sudáfrica realimentan el debate sobre cómo evolucionamos los humanos.



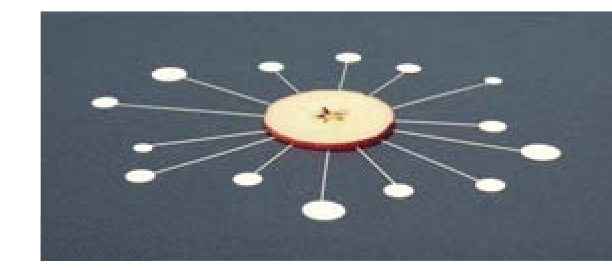


FÍSICA

Gravedad cuántica en Planilandia

Steven Carlip

Imagine que el espacio fuera bidimensional en lugar de tridimensional. ¿Cómo sería la fuerza de la gravedad? El estudio de esta cuestión está guiando a los físicos hacia una teoría unificada de la naturaleza.





SALUD PÚBLICA:
DOSSIER SOBRE LA POLIOMIELITIS

Polio: último acto

Helen Branswell

El nacimiento de la vacuna de la guerra fría

William Swanson

La polio en España

María José Báguena Cervellera



EXPLORACIÓN ESPACIAL

Destino: la Luna

Michael Belfiore

El próximo vehículo explorador que ronde por la superficie lunar puede que lo desarrollen estudiantes universitarios y empresas privadas con un presupuesto reducido.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Deborah Franklin, Maryn McKenna, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Ángel Garcimartín: *Nuevos estados marginales*; Diego A. R. Dalvit: *Cómo crear fotones a partir del vacío*; Raquel Santamarta: *¿Ha muerto la supersimetría?*; Juan Manuel González Mañas: *La singularidad de cada cerebro*; Yago Ascasibar: *El futuro de las estrellas*; José Manuel Vidal Donet: *Cerrar el paso al VIH y De cerca*; José Manuel García de la Mora: *Filosofía de la ciencia*; Laura Muñoz: *Foro científico*; Johannes Langemeyer y Annalena Hilchenbach: *El futuro de la energía solar*; Carlos Lorenzo: *Dinosaurios de un continente desaparecido*; Fabio Teixidó: *A golpe de palo de hockey*; J. Vilardell: *Materiales de reparación autónoma y Hace...*; Joandomènec Ros: *Apuntes y Taller y laboratorio*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España